

UNIVERSIDAD CARLOS III

**Escuela Politécnica Superior**

Departamento Ingeniería de Sistemas y Automática



## ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE ACTUADORES BASADOS EN ALEACIONES SMA

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Autor: Andrés Cano Sánchez  
Tutores: Javier González-Quijano Álvarez  
Mohamed Abderrahim

Octubre 2010





## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que se citan a continuación:

- Muy especialmente a mi tutor del proyecto, Javier González-Quijano, por confiar en mí y dedicarme todo su tiempo. Gracias a su experiencia científica, al buen ambiente creado en el laboratorio y la confianza que ha mostrado en mis ideas y sugerencias.
- A Mohamed Abderrahim que fue la primera persona que me informó acerca del proyecto, despertó mi interés y me brindó la oportunidad de trabajar en su laboratorio.
- A los técnicos de laboratorio por su amable disposición para suministrar material electrónico, realizar los pedidos de material y su aportación de ideas.
- A mi colega Álvaro que se incorporó más tarde al proyecto, y que continuará con gran éxito la investigación.
- A mi pareja por todos los años anteriores de apoyo, ilusión y motivación. Ha sido imprescindible para poder llegar hasta aquí.
- A mis padres y abuelos por su comprensión, empuje constante y por enseñarme a perseverar ante las dificultades.
- A mis amigos por la confianza que me muestran y los buenos momentos pasados.





## Índice general

Agradecimientos.....	1
<b>1 Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1 Motivación y origen del proyecto.....	10
1.2 Objetivos .....	11
1.3 Descripción del libro.....	11
1.4 Aleaciones con memoria de forma. SMA.....	12
1.4.1 Historia de las SMA y el Nitinol .....	12
1.4.2 La transformación martensítica. Perspectiva microscópica.....	13
1.4.3 La transformación martensítica. Perspectiva macroscópica.....	15
1.4.4 Efecto Memoria de Forma .....	16
1.4.5 Tipos de aleaciones con memoria de forma.....	17
1.4.6 Fabricación de las aleaciones NiTi.....	18
1.4.7 Aplicaciones del Nitinol .....	19
1.4.8 Aleación elegida de Niti.....	21
1.4.9 Propiedades y comportamiento de la aleación .....	22
1.5 Manos robóticas .....	25
1.5.1 Mano Belgrade/Usc (1969).....	25
1.5.2 Mano Standford/Jpl (Salisbury) (1981) .....	25
1.5.3 Mano Utah/Mit Dextrous (1982).....	26
1.5.4 Mano robot Matsuoka (1995).....	26
1.5.5 Mano Robonaut (1999).....	27
1.5.6 Mano DLR (2000) .....	27
1.5.7 I-Limb Hand (2003-2009).....	28
1.5.8 Mano Shadow Dexterous C6M (2009) .....	29
<b>2 Estado del arte.....</b>	<b>31</b>
2.1 Estudios existentes .....	32
2.2 Conclusiones.....	36
<b>3 Diseño del prototipo.....</b>	<b>37</b>
3.1 Arquitectura general .....	38
3.2 Diseño mecánico .....	39
3.2.1 Ecuaciones del modelo .....	39
3.2.2 Especificaciones técnicas .....	41
3.2.3 Dimensiones del cable de nitinol .....	42
3.2.4 Sistema de amortiguación.....	42
3.2.5 Sistema de eje, polea y rodamiento.....	46
3.2.6 Estructura de soporte .....	47
3.3 Diseño e implementación del sistema electrónico .....	50
3.3.1 Objetivos y especificaciones del sistema electrónico.....	50
3.3.2 Microcontrolador.....	52



3.3.3	Estudio teórico y experimental del circuito de conmutación electrónico .	54
3.3.3.1	Diseño y Simulación del circuito en Orcad .....	54
3.3.3.1.1	Simulaciones.....	56
3.3.3.1.1.1	Funcionamiento conmutación .....	56
3.3.3.1.1.2	Consumo de potencia IRF 530.....	60
3.3.3.1.2	Cálculo de disipadores de potencia .....	61
3.3.3.1.3	Frecuencia de funcionamiento.....	64
3.3.3.1.4	Circuito electrónico de pruebas .....	65
3.3.3.2	Medidas experimentales .....	66
3.3.3.2.1	Frecuencia de conmutación .....	68
3.3.4	Sensor de giro.....	69
3.4	Implementación del software .....	71
3.4.1	Programación PIC32.....	72
3.4.2	Programación en Matlab .....	73
3.4.3	Sintonización de un regulador PID mediante el método Ziegler-Nichols.	74
<b>4</b>	<b>Pruebas experimentales del prototipo .....</b>	<b>77</b>
4.1	Resultados del sistema completo .....	78
4.2	Resultados de las pruebas de control.....	79
<b>5</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>83</b>
5.1	Conclusiones generales .....	84
5.2	Trabajos futuros.....	84
<b>6</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>87</b>
6.1	Sitios web .....	88
6.2	Referencias .....	88
<b>7</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>91</b>
7.1	Presupuesto investigación.....	92
7.2	Diagrama Gantt .....	94
7.3	Estructura .....	95
7.4	Software utilizado.....	96
7.5	Código C programa PIC .....	96
7.6	Programa Matlab .....	102
7.7	Data sheets Componentes Electrónicos.....	103
7.8	Cable de nitinol .....	113



## Índice de figuras

Figura 1. Evolución estructura desde austenita (a) hasta martensita (d).	14
Figura 2. Mecanismos de acomodación a la forma del cambio, debido a la transformación martensítica. Acomodación por deslizamiento (a) la microestructura es dañada irreversiblemente. Acomodación por maclado (b) es reversible.	14
Figura 3. Forma gráfica de representación de los dos mecanismos de acomodación.	14
Figura 4. Tipo de ordenación de átomos de aleaciones SMA.	15
Figura 5. Representación de los cambios en las propiedades de una aleación SMA en una transformación martensítica.	15
Figura 6. Descripción microscópica del proceso de memoria de forma.	16
Figura 7. Descripción macroscópica del proceso de memoria de forma.	16
Figura 8. Stent autoajustable de Nitinol utilizado para ensanchar arterias y venas.	20
Figura 9. Colon ring utilizado en extirpaciones de colón.	21
Figura 10. Carrete utilizado de cable de nitinol, 0.51mm (0.020") de diámetro.	21
Figura 11. Evolución de la deformación del nitinol con la temperatura.	24
Figura 12. Posible configuración nitinol con muelle en extremo.	25
Figura 13. Mano Belgrade/Usc (1969).	25
Figura 14. Mano Standford/Jpl (Salisbury) (1981).	26
Figura 15. Mano Utah/Mit Dextrous (1982).	26
Figura 16. Mano robot Matsuoka (1995).	27
Figura 17. Mano Robonaut (1999).	27
Figura 18. Mano DLR (2000).	28
Figura 19. Sistema articulación de un dedo. I-Limb Hand.	28
Figura 20. Partes fundamentales I-Limb Hand.	28
Figura 21. Mano Shadow Dextrous C6M (2009).	29
Figura 22. Variación resistencia nitinol con la temperatura.	33
Figura 23. Ciclo de histéresis característico del comportamiento del nitinol.	33
Figura 24. Sistema motriz con alambres musculares.	34
Figura 25. Robot hexápodo GJ-M.	34
Figura 26. Control de posición PID con prealimentación.	34
Figura 27. Resultado control de posición. Se observa un claro retraso durante la recuperación de forma en el proceso de enfriamiento.	35
Figura 28. Sistema simple cable polea.	38
Figura 29. Esquema sistema completo actuador de nitinol.	38
Figura 30. Modelo sistema con doble muelle y nitinol.	39
Figura 31. Esquema detalle sistema cable polea.	39
Figura 32. Esquema funcionamiento en el estado inicial.	39
Figura 33. Esquema funcionamiento durante el calentamiento	40
Figura 34. Esquema funcionamiento durante el enfriamiento.	40
Figura 35. Esquema ensayo para cálculo K muelle.	43
Figura 36. Muelles de 3, 6 y 9 mm de diámetro correspondientemente.	43
Figura 37. Resultados ensayo muelle 1.	43
Figura 38. Relación deformación - fuerza muelle 1. Ajuste exponencial de la curva.	43
Figura 39. Relación deformación - fuerza muelle 2. Ajuste exponencial de la curva.	44
Figura 40. Relación deformación - fuerza muelle 3. Ajuste exponencial curva.	44
Figura 41. Esquema sistema eje-polea-rodamientos.	46
Figura 42. Eje rectificado ( $\Phi=2.3\text{mm}$ diámetro).	46
Figura 43. Rodamientos para eje de 2.3mm de diámetro.	46
Figura 44. Características rodamiento. Modelo elegido RJ-3332.	47
Figura 45. Polea con canal interior moleteado y acoplable a eje. ( $\Phi_{\text{ext}} = 8\text{mm}$ ; $\Phi_{\text{eje}}=2.38\text{mm}$ ).	47
Figura 46. Diseño 3D de la estructura.	48
Figura 47. Diseño 3D explosionado estructura.	48
Figura 48. Plano detalle 2D. Alzado, planta y perfil de la estructura.	48
Figura 49. Sistema completo con muelle, correa y cable de nitinol.	49
Figura 50. Detalle estructura. Eje, polea y rodamientos embutidos en metacrilato.	50
Figura 51. Esquema detallado sistema electrónico.	50
Figura 52. Esquema control posición.	51



Figura 53. Esquema control PID en paralelo.	51
Figura 54. Esquema características PIC 32.	53
Figura 55. Placa con controlador PIC 32 (izquierda). Placa de expansión DM320002 (derecha).	53
Figura 56. Esquema detallado conexiones PIC y el sistema electrónico.	53
Figura 57. Esquema de los modos de conducción de la corriente.	54
Figura 58. Esquema completo circuito conmutación.	54
Figura 59. Curvas características Id-Vds IRF530.	55
Figura 60. Esquema de dos Mosfet en serie.	55
Figura 61. Corriente Niti 1 y 2 y señal V1. Configuración 1 (Niti 1 ON).	56
Figura 62. Vgs de todos los transistores. Configuración 1 (Niti 1 ON).	57
Figura 63. Corriente Niti 1 y 2 y señal V2. Configuración 2 (Niti 2 ON).	57
Figura 64. Vgs de todos los transistores. Configuración 2 (Niti 2 ON).	58
Figura 65. Corriente Niti 1 y 2 y señal V1. Configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).	58
Figura 66. Vgs de todos los transistores. Configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).	59
Figura 67. Corriente Niti 1 y 2. Señal V1 y V2. Configuración 4 (Niti 1 OFF, Niti 2 OFF).	59
Figura 68. Vgs de todos los transistores. Configuración 4 (Niti 1 OFF, Niti 2 OFF).	60
Figura 69. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).	60
Figura 70. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).	60
Figura 71. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).	61
Figura 72. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).	61
Figura 73. Relación factor de disipación potencia - temperatura.	62
Figura 74. Esquema montaje de un disipador en cápsula TO-220 del Mosfet.	62
Figura 75. Circuito térmico equivalente.	62
Figura 76. Disipador aleteado HSAP29-1.	63
Figura 77. Análisis en frecuencia de la configuración 1 (Niti 1 ON).	64
Figura 78. Análisis en frecuencia de la configuración 2 (Niti 2 ON).	64
Figura 79. Análisis en frecuencia de la configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).	65
Figura 80. Esquema completo final del circuito de conmutación.	65
Figura 81. Tabla intensidad máxima para cable unipolar. REBT.	66
Figura 82. Circuito final montado sobre placa de pruebas.	66
Figura 83. Circuito conmutación y PIC conectados.	66
Figura 84. Simulación configuración 3 (activar niti 1 y 2).	67
Figura 85. Conmutación Niti 1 y 2 a 400 Hz.	68
Figura 86. Conmutación Niti 1 y 2 a 4 kHz.	68
Figura 87. Conmutación Niti 1 y 2 a 7 kHz.	68
Figura 88. Conmutación Niti 1 y 2 a 14 kHz.	68
Figura 89. Conmutación Niti 1 y 2 a 10 kHz.	68
Figura 90. Conmutación Niti 1 y 2 a 17 kHz.	68
Figura 91. Conmutación Niti 1 y 2 a 17.5 kHz.	69
Figura 92. Sensor de giro potenciométrico.	69
Figura 93. Medidas sensor giro potenciométrico.	69
Figura 94. Esquema tensión de entrada en convertidor A/D.	70
Figura 95. Porcentaje de la resistencia en función del ángulo girado.	71
Figura 96. Disco resistivo del sensor desmontado y acoplado al eje.	71
Figura 97. Diagrama de flujo del programa del PIC.	72
Figura 98. Diagrama de flujo del programa de Matlab.	73
Figura 99. Respuesta teórica ante entrada escalón.	74
Figura 100. Respuesta sistema real con control proporcional. Cálculo coeficientes del sistema.	75
Figura 101. Sistema completo. Estructura con cable de nitinol, muelle y correa. Placa electrónica. Sensor. PIC y placa expansión. Fuente de alimentación. PC.	78
Figura 102. Respuesta sistema con sistema de control simple.	79
Figura 103. Detalle figura 102. Tiempo de respuesta para una deformación del 4%, $I=4$ A, $\Phi=0.51$ mm.	80
Figura 104. Detalle figura 102. Proceso de enfriamiento. Recuperación de forma durante la transformación martensítica.	80





Figura 105. Detalle figura 102. Posición real y referencia con control simple.	81
Figura 106. Error de posición del sistema.	81
Figura 107. Detalle figura 106. Error de posición no superior 5%.	81
Figura 108. Velocidad angular de la polea.	82
Figura 109. Velocidad lineal de la polea y en el extremo del dedo.	82

## Índice de tablas

Tabla 1. Características principales aleaciones SMA.	18
Tabla 2. Principales características aleación nitinol utilizada.	22
Tabla 3. Características eléctricas y térmicas cables de nitinol según diámetro.	23
Tabla 4. Relación presión – recuperación deformación de la aleación de nitinol.	24
Tabla 5. Fuerza máxima de cada grado de libertad de la mano robótica Shadow.	41
Tabla 6. Resultados ensayo muelle 2.	44
Tabla 7. Resultados ensayo muelle 3.	44
Tabla 8. Valores medios constante elástica (K).	45
Tabla 9. Presión ejercida por cada muelle.	45
Tabla 10. Frecuencias máximas de funcionamiento.	64
Tabla 11. Características cables de nitinol de prueba.	67
Tabla 12. Resultados de las pruebas de funcionamiento de la placa electrónica.	67
Tabla 13. Resumen valores reales tensión y corriente en cables de nitinol.	67
Tabla 14. Características sensor giro potenciométrico.	70

## Índice de ecuaciones

Cálculo peso cable nitinol.	22
Potencia consumo nitinol.	23
Estado inicial sistema simple.	39
Calentamiento sistema simple.	40
Enfriamiento sistema simple.	41
Fuerza perpendicular máxima.	47
Tiempo de ciclo.	51
Tensión Vgs para activar mosfet en serie.	56
Temperatura máxima del semiconductor.	62
Potencia que disipa el mosfet a Tc	62
Potencia total disipada.	62
Función de transferencia lazo abierto.	74
Coeficientes lazo abierto.	74
Parámetros del controlador PID.	74
Función de transferencia lazo cerrado.	75
Coeficientes del controlador PID.	75
Criterio tiempo de muestreo.	75





# 1 Introducción

---

Presentación del proyecto Handle, introducción a las aleaciones SMA y evolución de manos robóticas. Objetivos marcados y descripción del libro.



## 1.1 Motivación y origen del proyecto

El uso de robots para aplicaciones industriales ha permitido aumentar la productividad de la fabricación, ahorrar costes, aumentar la flexibilidad y en consecuencia mejorar la competitividad de las empresas. Las prestaciones de estos robots superan los de la mano de obra humana en determinadas operaciones, además de afrontar tareas de riesgo sin problema. Sin embargo, existen tareas de manipulación de productos, piezas y herramientas en la industria, que requieren de mano de obra directa y no se pueden sustituir por manipuladores industriales. Cuando se hayan logrado desarrollar manos robóticas capaces de mejorar las operaciones de manipulación de un humano, se podrá aumentar el grado de automatización de cualquier proceso de fabricación.

Desde el punto de vista biomédico, la aplicación de algunos de los últimos avances en robótica supone un beneficio para las personas que sufren algún tipo de minusvalía. Actualmente el 15 por ciento de la población europea sufre algún tipo de discapacidad física, y en concreto un 0.15 por ciento tiene una extremidad amputada <sup>[1]</sup>. Se trata de un beneficio importantísimo que no es cuantificable directamente desde el punto de vista económico, a diferencia del beneficio en aplicaciones industriales mencionado anteriormente. Ya existen prótesis biónicas para pierna, brazo y en menor medida para mano. El desarrollo de esta tecnología permitirá la reducción de costes y el acceso de la sociedad a estas soluciones médicas.

Para cualquiera de estas dos ramas, biomedicina o industria, la mano robótica es el dispositivo más complejo y menos desarrollado a día de hoy. El sistema de accionamiento de las manos existentes no ha evolucionado, y aún recurre a la tecnología de motores eléctricos para mover las articulaciones utilizando tendones o engranajes. A pesar del hecho de que este tipo de actuadores y su control está muy estudiado, existen limitaciones importantes que a día de hoy parecen insalvables como son el peso, tamaño, fuerza, reversibilidad mecánica (*Backdriveability*), capacidad intrínseca para el control de impedancia y gasto energético.

El presente proyecto trata explorar el campo de nuevos actuadores para proveer una solución a los problemas citados anteriormente. Diversos estudios biomédicos que catalogan a los músculos humanos como un modelo ideal de sistema de actuación a seguir en el desarrollo de sistemas robóticos que interaccionan con humanos o que desarrollen tareas similares. Siguiendo esta idea, se ha decidido investigar el campo de los músculos artificiales basados en aleaciones con memoria de forma (SMAs).

Esta línea de investigación forma parte del proyecto europeo HANDLE, el cual trata de estudiar técnicas de control y nuevas tecnologías que mejoren la capacidad de manipulación de las manos robóticas actuales. Dicho proyecto está formado por un consorcio de ocho grupos de investigación y una empresa repartidos en seis países. La Universidad Pierre et Marie Curie de París coordina dicho proyecto en el que colabora entre otros el grupo de investigación RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid. Para alcanzar el objetivo del proyecto el trabajo se divide en nueve paquetes. Un ejemplo de estos paquetes de trabajo, es el estudio de los movimientos humanos durante tareas de manipulación, con el objetivo de extraer estrategias que puedan aplicarse al control del robot manipulador. Otro paquete de trabajo se centra en el desarrollo de algoritmos de aprendizaje que sean capaces de manejar el conocimiento del entorno de manera inteligente, pudiendo superar la incertidumbre en los modelos intervinientes. Además existe un paquete específico que se centra en la mejora de las capacidades de percepción, incluyendo la táctil y la visual principalmente. Este proyecto de fin de carrera se enmarca en un paquete especial llamado Nuevas tecnologías para futuras manos robóticas, donde entre otras tareas se estudian tecnologías de accionamiento alternativas para ser utilizados en manos robóticas antropomórficas y quizás en futuras prótesis biónicas.



## 1.2 Objetivos

El primer objetivo del proyecto es realizar un estudio de los sistemas de accionamiento actuales en manos robóticas y su evolución con el propósito de conocer sus características y prestaciones.

El siguiente objetivo es realizar un estudio del estado del arte en relación al uso de aleaciones con memoria de forma en actuadores. Esto servirá para conocer las limitaciones de los actuales prototipos, identificar las posibles mejoras y obtener conclusiones acerca de la viabilidad del sistema de actuación que se quiere implementar.

El siguiente objetivo es diseñar e implementar un prototipo que sirva como banco de pruebas para la investigación en actuadores basados en SMA. El prototipo deberá cumplir con unos requisitos mínimos como: dimensiones reducidas, alta precisión, bajo rozamiento y alta velocidad de adquisición de datos. Este prototipo estará formado por dos subsistemas:

- Una estructura mecánica para dar soporte al cable de nitinol, sensor, polea, eje y el resto de elementos del accionamiento.
- Un subsistema electrónico que incluye:
  - Etapa de potencia destinada a regular la corriente entregada al SMA.
  - Sensor de posición para leer la posición del eje.
  - Un microprocesador que se encargará de controlar el sistema y lograr que el eje siga las órdenes dadas por un PC.

Por último, se utilizará el banco de pruebas desarrollado para la realización de unos estudios preliminares acerca del comportamiento dinámico de este tipo de actuadores. Será necesario comprobar la controlabilidad del sistema, analizar las limitaciones existentes y proponer mejoras futuras para perfeccionar el funcionamiento del actuador.

## 1.3 Descripción del libro

El trabajo se divide en siete capítulos con el objetivo de introducir la tecnología utilizada, estudiar el estado del arte de dicha tecnología, explicar el diseño del prototipo, las pruebas realizadas y extracción de conclusiones.

En el capítulo 1 actual, se realiza una introducción a las aleaciones con memoria de forma SMA y se desarrolla una pequeña evolución de las manos robóticas y sus sistemas de accionamiento.

En el capítulo 2 se realiza un estudio del arte donde se resume la información y conocimientos adquiridos de los principales estudios e investigaciones realizados sobre el uso del nitinol como actuador.

En el capítulo 3 se realiza una descripción general del sistema propuesto; se dedica un apartado para cada uno de los subsistemas. Así se explican las partes electrónica, mecánica y software necesarias para entender el sistema en detalle.

En el capítulo 4 se explican las pruebas realizadas con el prototipo fabricado y se muestran las gráficas obtenidas que ayudan a conocer el funcionamiento del actuador. También se propone un regulador PID para control de la posición.



En el capítulo 5 se desarrollan las conclusiones de todo el sistema, y se proponen las mejoras y consideraciones para las siguientes versiones del prototipo, así como qué aspectos fundamentales deben ser especialmente estudiados.

En el capítulo 6 se muestran las hojas de características de los principales componentes electrónicos y mecánicos utilizados, útiles para una consulta rápida.

En el último apartado, capítulo 7, se indican las referencias bibliográficas consultadas durante el desarrollo del proyecto.

## 1.4 Aleaciones con memoria de forma. SMA

Para el desarrollo del nuevo sistema de accionamiento, se utiliza un material poco conocido y aún con pocas aplicaciones industriales. Se recurre a una aleación níquel-titanio denominada nitinol, que pertenece a aquellas aleaciones con memoria de forma. En los siguientes apartados se introducen este tipo de materiales y se desarrolla en concreto las capacidades y características de dicho material. También se revisan las principales aplicaciones de estas aleaciones, tanto en el campo de la biomedicina, donde han encontrado mayor cabida, como en el campo industrial.

Las aleaciones SMA ("Shape Memory Alloy") son aleaciones metálicas que, después de una deformación aparentemente plástica, vuelven a su forma original cuando son sometidas a un calentamiento. Los mismos materiales, dentro de un determinado rango de temperaturas, pueden ser deformados hasta casi un 10% volviendo a recuperar su forma original al ser descargados. Estos efectos son llamados memoria de forma térmica (o Efecto memoria de forma) y memoria de forma elástica (o Superelasticidad). Ambos efectos se deben a un cambio de fase llamado transformación martensítica termoelástica. Las aplicaciones potenciales de estos dos principales comportamientos son para generar fuerza o movimiento (mediante el efecto memoria de forma) o almacenar energía (superelasticidad).

En este capítulo se exponen, después de una breve introducción a la historia de este tipo de aleaciones, los principios microscópicos y macroscópicos de la martensita de un modo cualitativo, pues son la base para el entendimiento de la memoria de forma. Posteriormente se revisan las principales características de las aleaciones con memoria de forma: se comienza analizando las propiedades metalúrgicas desde un nivel microscópico para finalmente explicar las transformaciones de fase que se observan microscópicamente y que dan lugar al efecto de memoria de forma.

### 1.4.1 Historia de las SMA y el Nitinol

Los primeros pasos en el descubrimiento del efecto memoria de forma datan de 1930, cuando A.Ölander descubre el efecto superelástico en una aleación Au-Cd en 1932 [1] y, más tarde, Greninger y Mooradian [2] observan la aparición y desaparición de la fase martensita, a medida que crece y decrece la temperatura en una aleación de Cu-Zn. Los fundamentos del efecto memoria gobernado por el comportamiento termoelástico de la martensita se explican una década más tarde por Kurdjumov y Khandros [3] y también por Chang y Read [4]. El descubrimiento más importante se realiza en 1962, cuando Buehler y sus colaboradores, en el Naval Ordnance Laboratory (ahora Naval Surface Warfare Center), desarrollan una aleación de níquel y titanio (NiTi) con un efecto memoria de forma aún más acusado que el descubierto con el AuCd y que se denomina como Nitinol (derivado de Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) [5]. El descubrimiento de Buehler abre una gran puerta a la investigación en la búsqueda de nuevas aleaciones con capacidades de memoria de forma, así como al estudio de su comportamiento mecánico y sus posibles aplicaciones. Pero, pese a todos los avances que se realizan en el descubrimiento de nuevas aleaciones metálicas con estas



propiedades, el Nitinol se mantiene como la aleación más comercial y más extendida debido a su buena estabilidad al ciclado, biocompatibilidad, resistencia a la corrosión y capacidad de recuperar grandes deformaciones.

#### 1.4.2 La transformación martensítica. Perspectiva microscópica

Las transformaciones de estado de los sólidos son de dos tipos: de difusión y de desplazamiento [6]:

- Las transformaciones por difusión son aquellas en las que sólo se puede formar una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes. Se requiere un amplio rango de difusión porque la nueva fase es de diferente composición química que la matriz de la que se forma. Dado que se requiere una migración atómica, la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura.
- Las transformaciones por desplazamiento no requieren un amplio rango de movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesaria una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la interfase entre las dos fases es tremendamente rápido, estando limitado sólo por la velocidad del sonido. Se suelen llamar transformaciones atéricas, dado que la cantidad de nueva fase creada usualmente depende sólo de la temperatura y no de la cantidad de tiempo a esa temperatura.

Las transformaciones martensíticas son generalmente de este segundo tipo, y se forman enfriando desde una fase a alta temperatura llamada fase madre o austenita. Los términos de martensita y austenita originalmente se referían sólo a fase de aceros, sin embargo se ha extendido el término refiriéndose no sólo al material sino al tipo de transformación. Estas transformaciones se denominan de primer orden, en el sentido de que se libera calor en su formación, hay una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperatura en que coexisten austenita y martensita.

De forma resumida, la principal característica de la martensita es que se forma enfriando. Con una fracción de volumen de martensita que aumenta a medida que la temperatura se reduce, pero con una fracción de volumen independiente del tiempo y que hereda la composición y la ordenación atómica de la fase madre (debido a la ausencia de difusión). En la figura 1 se esquematiza la estructura austenita en el diagrama (a), y la progresión hacia una estructura totalmente martensita se reproduce de (b) a (d). A medida que la interfase avanza, cada capa de átomos se desplaza tan solo una pequeña distancia. Como resultado final de esos pequeños movimientos coordinados se obtiene la nueva estructura martensítica. La segunda parte de la transformación martensítica, cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma, y frecuentemente volumen, que la austenita circundante. La martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras que aleaciones con memoria de forma, como por ejemplo Ni-Ti, básicamente tienen sólo cambio de forma.

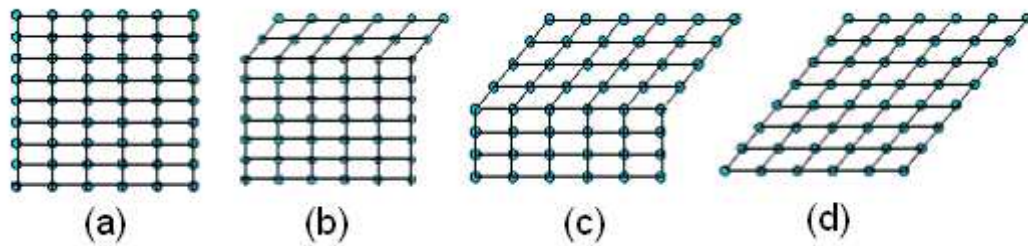


Figura 1. Evolución estructura desde austenita (a) hasta martensita (d).

Tanto la forma de la nueva fase, como la austenita, se deben ser alterar para acomodarse a una nueva estructura. Hay dos mecanismos generales por los cuales esto puede pasar: por deslizamiento o por maclado (figura 2 y 3). En ambos casos, cada celda individual, o paralelogramo, tiene la nueva estructura martensítica pero la forma en conjunto es la de la austenita original. El deslizamiento es un proceso permanente y es un mecanismo común en la mayoría de martensitas.

Para que la memoria de forma ocurra de un modo significativo, se requiere que la acomodación sea completamente reversible, es decir, el maclado debe ser el proceso de acomodación predominante.

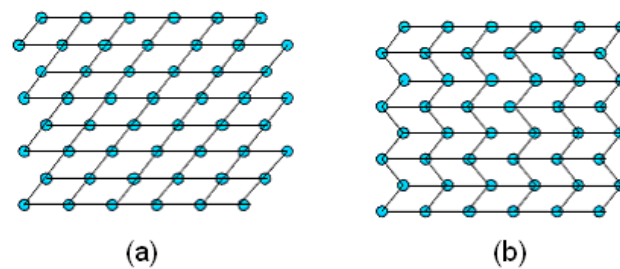


Figura 2. Mecanismos de acomodación a la forma del cambio, debido a la transformación martensítica. Acomodación por deslizamiento (a) la microestructura es dañada irreversiblemente. Acomodación por maclado (b) es reversible.

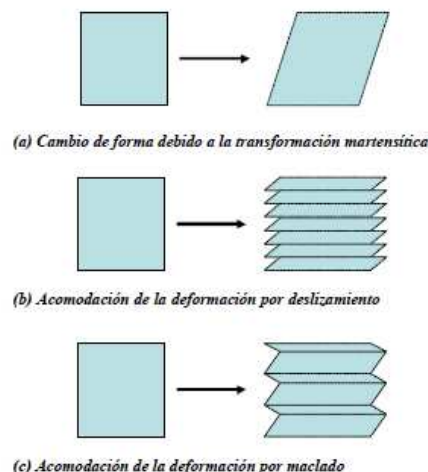


Figura 3. Forma gráfica de representación de los dos mecanismos de acomodación.

En Ni-Ti, los átomos de Ni y Ti se hallan en sitios muy específicos. Durante la transformación martensítica, la martensita adquiere la misma ordenación que la austenita, y a esto se le llama ordenación heredada. En la figura 4 se observa como las estructuras tienen una simetría cúbica centrada en el cuerpo BCC para el primer caso. El segundo caso se denomina estructura B2 o estructura CsCl. Las aleaciones con



memoria de forma se basan generalmente en una simetría BCC, menos frecuentemente en la estructura B2, y algunas con una ordenación aún más compleja llamada DO3, también basada en la simetría BCC. El caso del Ni-Ti corresponde a una estructura B2, donde los distintos átomos se distribuyen en la red cúbica consiguiendo la máxima separación posible.

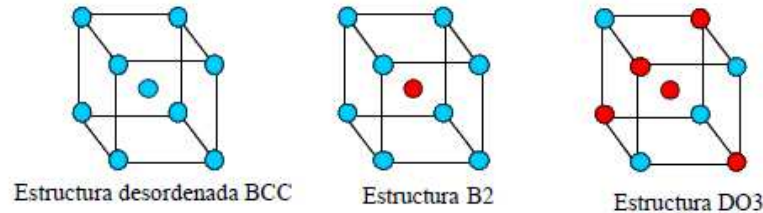


Figura 4. Tipo de ordenación de átomos de aleaciones SMA.

### 1.4.3 La transformación martensítica. Perspectiva macroscópica

Desde un punto de vista macroscópico, prácticamente todas las propiedades físicas de la austenita y martensita son diferentes, y por ello a medida que se atraviesa el punto de transformación mediante una variación de las temperaturas, aparecen una gran variedad de cambios en las propiedades significativas [7].

Cualquiera de ellos puede usarse para seguir el progreso de la transformación (figura 5). Las temperaturas  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  y  $A_f$  se refieren a las temperaturas a las cuales la transformación martensítica comienza y acaba, y la temperatura a la cual la transformación austenítica empieza y termina. No existe una determinada temperatura sino un rango de temperaturas en el que se produce la transformación, denominadas temperaturas características o temperaturas de transformación.

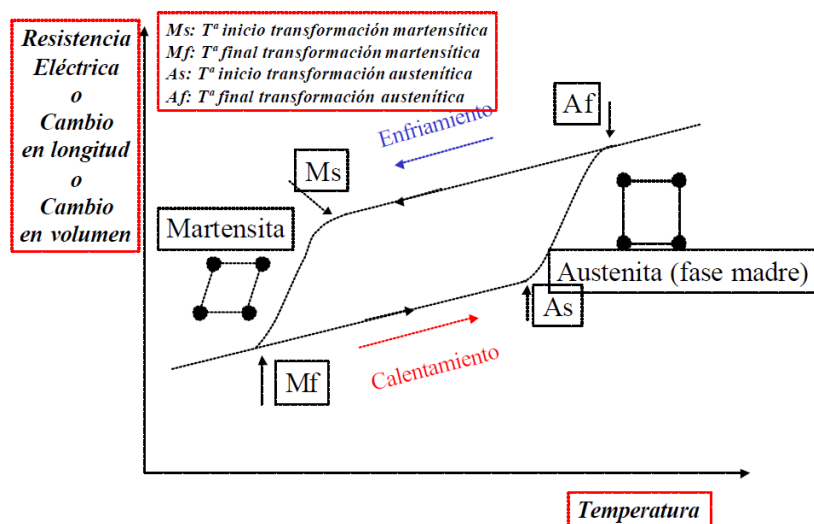


Figura 5. Representación de los cambios en las propiedades de una aleación SMA en una transformación martensítica.

En el proceso de enfriamiento, la primera de estas temperaturas es la temperatura de inicio de la transformación martensítica ( $M_s$ ), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina a medida que decrece la temperatura a una temperatura cercana a  $M_f$  o temperatura final de la transformación martensítica. El siguiente conjunto de temperaturas características de transformación es la temperatura de inicio de la transformación austenítica y la final de austenita,  $A_s$  y  $A_f$  respectivamente. La formación de la fase austenítica comienza a medida que la aleación, en el proceso de calentamiento, alcanza la temperatura  $A_s$ . Se comienza a formar entonces una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura,

que se termina de formar alrededor de  $A_f$ . Cuando el elemento se calienta más allá de  $A_f$ , la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto memoria de forma. Los procesos de transformación de austenita a martensita y viceversa, siguen diferentes caminos como consecuencia de la histéresis de la transformación.

Se define pico de austenita ( $A_p$ ) y de martensita ( $M_p$ ) como aquella temperatura donde el 50% del material ya se ha transformado. La magnitud de la histéresis depende de la aleación, pero normalmente son típicos los rangos de valores entre 20-40°C para materiales con memoria de forma. Existen muchas propiedades de las SMA que varían con la transformación martensítica, pero una de las que cambia de modo más significativo es el límite elástico.

#### 1.4.4 Efecto Memoria de Forma

Como ya se ha explicado anteriormente, la martensita es generalmente una fase menos simétrica que la austenita. Desde un punto de vista microscópico, enfriando desde austenita se forman las variantes de martensita autoacomodadas (martensita maclada y demaclada). Calentando desde los estados anteriores, se vuelve a la estructura y forma original austenítica como se muestra a continuación (figura 6).

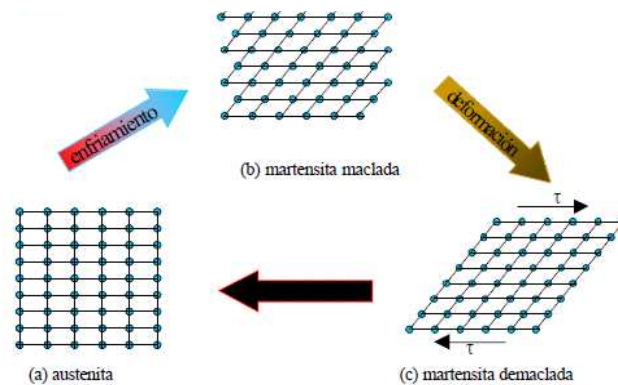


Figura 6. Descripción microscópica del proceso de memoria de forma.

Desde un punto de vista macroscópico el efecto de memoria de forma también puede describirse esquemáticamente (figura 7).

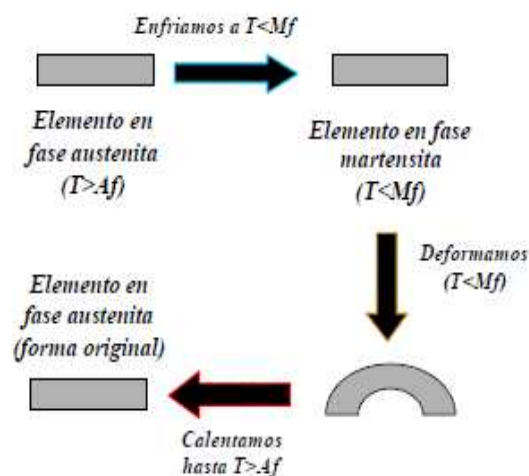


Figura 7. Descripción macroscópica del proceso de memoria de forma.

No hay cambio en la forma de un elemento enfriado desde una temperatura superior a  $A_f$  hasta una inferior a  $M_f$ . Cuando el elemento se deforma y su temperatura es inferior a  $M_f$  permanece con esa deformación hasta que se calienta. La recuperación de la



forma comienza en As y es completada en Af. En el punto de inflexión entre As y Af, cerca del 50% de la forma original ya está recuperada. Una vez que la forma se ha recuperado en Af, no hay más cambios en la forma cuando el elemento es enfriado hasta una temperatura inferior a Mf. La memoria de forma puede sólo ser reactivada deformando la martensita otra vez. En resumen, el efecto memoria de forma ocurre sólo una vez, y por eso se suele llamar memoria de forma simple, en contraste con el doble efecto memoria de forma, que puede existir en otras aleaciones. Las deformaciones de recuperación son del orden del 7% en las aleaciones SMA, aunque algunas llegan al 10%.

#### 1.4.5 Tipos de aleaciones con memoria de forma

Existen muchas aleaciones que presentan propiedades de memoria de forma y superelasticidad, pero solo unas pocas han sido desarrolladas comercialmente, como las de NiTi, NiTi-X (donde X es un elemento ternario) y Cu-Zn-Al. En la actualidad, el 90% de las nuevas aplicaciones se basan en NiTi, NiTiCu y NiTiNb. Otras aleaciones como CuAlNi o FeMnSi comienzan a introducirse en el mercado.

Algunas investigaciones se centran en aleaciones con Pt como elemento base por dos motivos fundamentales: por un lado, las aleaciones de NiTi y CuZnAl solo pueden ser usadas hasta alrededor de los 100°C, con lo que se requieren aleaciones de utilización a temperaturas mayores. Por otro lado, ni el cobre ni el níquel son biocompatibles y una de las aplicaciones más interesantes de las SMA es en implantes que deben asegurar la biocompatibilidad de las aleaciones NiTi. Estas aleaciones de base Pt, son aleaciones dúctiles y son capaces de operar hasta los 1000°C. Las más usuales son Fe<sub>3</sub>Pt, Pt<sub>3</sub>Al y TiPt, las dos últimas para alta temperatura y aplicaciones in vivo.

Como se ha explicado las aleaciones de NiTi y CuZnAl presentan temperaturas entre -100°C y +100°C. Es evidente que en un rango superior de temperaturas, los procesos de difusión controlada, descomposición, recrystalización y recuperación no pueden ser despreciables para el análisis de la transformación martensítica [8]. Existen aleaciones con mayor rango de temperatura, como las de CuAlNi que llegan a los 200°C pero no son estables en el ciclado. Es por ello que se investiga en algunas aleaciones ternarias como NiTiPd o NiTiHf y NiTiZr, que presentan también altas temperaturas de transformación pero aún no son comerciales. Otro de los motivos de adición de elementos ternarios es poder alterar la histéresis del comportamiento en el calentamiento y enfriamiento. Las aleaciones binarias NiTi tienen un ancho de histéresis de entre 25°C y 40°C. Si se añade Niobio y un determinado tratamiento termomecánico, podemos conseguir ensanchar el ancho de histéresis hasta 150°C.

Si las aplicaciones son para usos criogénicos, las aleaciones NiTi se vuelven muy frágiles con lo que se suele añadir Fe, sin embargo la aleación resultante tiene una limitada deformación de memoria y baja ductilidad.

A pesar de todas las investigaciones en busca de nuevas aleaciones con memoria de forma, las únicas aleaciones comerciales en la actualidad son las NiTi y las de base Cu. Las aleaciones NiTi presentan las siguientes ventajas comparado con las aleaciones de base Cu:

- Tienen mayor capacidad de memoria (hasta un 8% mientras que sólo se alcanza un 4-5% en las de base Cu).
- Son mucho más estables térmicamente
- Poseen mejor resistencia a la corrosión que el cobre
- Tienen mayor resistividad eléctrica (siendo pues su activación eléctrica más simple), Pueden ser aleadas y extruidas con facilidad
- Tienen un mayor rango de posibles temperaturas de transformación.



En cuanto a los inconvenientes de las aleaciones de Niti comparado con las de base Cu, son los siguientes:

- Son mucho más caras y más difíciles de mecanizar
- El ciclo de histéresis de las aleaciones NiTi suele ser muy pronunciado (grandes cambios en la deformación con pequeños cambios de T), lo que suele ser útil si se desea una aplicación en la que se realice una función al alcanzar una T, pero dificulta la aplicación para control proporcional.

En la siguiente tabla (tabla 1) se muestra una comparación entre algunas de las principales aleaciones SMA.

<i>Aleación</i>	<i>composición</i>	<i>Rango de temperaturas (°C)</i>	<i>Histéresis (°C)</i>
Ag-Cd	44/49 at %Cd	-190 a -50	15
Au-Cd	46,5/50 at % Cd	30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/14,5 at %Al; 3/4,5 wt% Ni	-140 a 100	35
Cu-Sn	15 at % Sn	-120 a 30	
Cu-Zn	38,5/41,5 wt % Zn	-180 a -10	10
In-Ti	18/23 at % Ti	60 a 100	4
Ni-Al	36/38 at % Ti	-180 a 100	10
Ni-Ti	49/51 at % Ni	-50 a 110	30
Fe-Pt	25 at % Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 at % Cu	-250 a 180	24
Fe-Mn-Si	32 wt%Mn; 6 wt% Si	-200 a 150	100

Tabla 1. Características principales aleaciones SMA.

#### 1.4.6 Fabricación de las aleaciones NiTi

Para asegurar la calidad y consistencia de los materiales fabricados con Nitinol se deben conocer y entender los procesos seguidos para obtener este material y los efectos que tiene en las propiedades y formas finales.

Es muy importante recordar que las temperaturas de transición son altamente sensibles a la composición de la aleación: una variación de un 1% en la cantidad de cualquiera de los dos (Ni o Ti) puede cambiar 100°C la temperatura de transformación. La familia de aleaciones típicas NiTi comerciales cubre un rango de temperaturas de transformación Af desde 100°C hasta -50°C. Por ello, en la fabricación se utiliza un DSC (calorímetro de escaneo diferencial) para asegurar la temperatura Af final que se garantiza en la venta.

Todos los componentes que compuestos por nitinol (alambres, tubos, flejes, barras, láminas...) siguen los mismos pasos de fabricación:

- **Paso 1. Método de aleado**

Se trata de un proceso que requiere mucho cuidado, cualquier contaminante significaría cambiar la aleación y probablemente desecharla. Los materiales aleados deben estar muy bien mezclados para asegurar homogeneidad y uniformidad. Se suele hacer en horno de vacío o atmósfera inerte. Los más usados son Aleado en vacío por inducción (VIM) y realeado en vacío por arco (VAR) con el que se consigue la mayor pureza posible en la aleación.

- **Paso 2. Refino de la estructura en caliente**

Se refina la microestructura mediante una deformación adicional. La microestructura de la aleación recién obtenida tiene muy poca ductilidad y ha de ser trabajada en caliente. Dependiendo de la forma final el tratamiento puede



ser distinto: extrusión, laminado en barra o lámina, forjado. Las temperaturas suelen ser entre 600°C y 800°C.

- **Paso 3. Acabado final en frío**

Para conseguir las propiedades mecánicas y físicas deseadas en la mayoría de las aplicaciones, es necesario realizar un trabajado en frío en varios pasos (los más comunes son laminado en frío y extrusionado). Con el trabajo en frío se obtiene la forma final, el acabado superficial final, una microestructura refinada y las propiedades mecánicas deseadas.

- **Paso 4. Tratamiento térmico final**

En muchas aplicaciones, el Nitinol todavía no presenta las propiedades deseables en esta condición de trabajado en frío. Es por ello que requiere un tratamiento térmico final después del último trabajado en frío, entre 450-550°C.

#### 1.4.7 Aplicaciones del Nitinol

En este apartado se comentarán las aplicaciones reales y en fase de estudio de estas aleaciones, y en concreto del Nitinol. Algunas de estas aplicaciones ya son comerciales y otras aún están en fase de estudio. Las causas de que las aplicaciones de estas aleaciones no hayan sido tan numerosas como debería esperarse son variadas. En primer lugar, porque durante mucho tiempo se ha solapado el desarrollo de estas aleaciones con la introducción en el mercado y por tanto los precios eran muy altos para cubrir estos gastos de marketing y de desarrollo. En segundo lugar porque se ha tratado de competir con productos alternativos muy fiables y bien posicionados en el mercado, que ofrecían las mismas ventajas a menores precios. En tercer lugar no se han realizado planes de marketing adecuados, pues no se tenía claro el perfil de cliente que demandaba el producto.

Antes de clasificar las aplicaciones de estas aleaciones es conveniente, en primer lugar, saber para qué se pueden usar: el efecto memoria de forma puede ser usado para generar movimiento o fuerza. Se puede aprovechar sus propiedades de varias maneras:

- Se puede aplicar el elemento utilizando su **recuperación libre**, es decir, a temperatura ambiente y estando en martensita, se deforma el elemento y se calienta, aprovechando la recuperación de forma. Esto se puede emplear, por ejemplo, en acoplamientos.
- Si en las mismas condiciones se estira pero se fija el elemento antes de calentar (impedimos que recupere su forma), se utiliza la **recuperación impedida**, produciendo fuerza en el calentamiento. Si la fuerza opositora puede ser vencida por el SMA generará desplazamiento frente a una fuerza, es decir, trabajo. Por ejemplo, al calentar se contraerá y levantará un peso. En el enfriamiento, la misma carga alargará de nuevo el alambre y reseteará el mecanismo; esto es llamado **efecto doble con fuerza exterior restauradora**. En condiciones óptimas de temperatura y sin presencia de carga, la deformación recuperable puede llegar a ser del 8%, pero para aplicaciones cíclicas la deformación suele ser mucho menor.

El primer éxito de aplicación utilizó el efecto de la recuperación impedida para usos de uniones y cierres. La casa Raychem Corp. desarrolló en los principios de 1970 uniones de tubos para aplicaciones aéreas y marinas. El concepto era simple: se mecaniza un acoplamiento con un diámetro interior 3% menos que el diámetro del tubo al que será unido. Se enfría hasta estado martensítico, se expande radialmente un 8% y, ya colocado, se calienta hasta el contacto, desarrollando una enorme fuerza de unión. Estas uniones permanecen inalterables aún enfriando por debajo de -20°C. Como ventajas de estos acoplamientos son su ligereza, la facilidad de instalar incluso en zonas no accesibles, la fiabilidad, sus buenas propiedades a impactos, vibraciones y



cicladados térmicos. Como grandes inconvenientes está el alto coste, la temperatura de operación limitada ( $-20^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ ); y la cantidad de movimiento permitido limitado [8].

En aplicaciones para utilizarlas como actuadores su función consiste en un cambio de forma al cambiar la temperatura. Este cambio de temperatura puede ser causado por cambio en la temperatura ambiente o calentado eléctricamente. En el primer caso, el actuador actúa como sensor y actuador (actuador térmico) mientras que en el segundo caso es sólo actuador eléctrico. Ambos actuadores combinan gran movimiento, pequeñas dimensiones y relativas altas fuerzas, por tanto generan mucho trabajo. El más usual consiste en una única pieza de SMA en forma de alambre o de muelle. El diseño requiere usualmente: temperatura de transformación al calentar, temperatura de reseteo (histéresis), fuerza (tensión), desplazamiento (deformación), estabilidad cíclica (fatiga), tiempo de respuesta al calentar y enfriar, dimensiones, tolerancias de sobre tensión y sobre temperatura, etc. El único realmente con gran éxito comercial es una válvula de control de presión en la transmisión automática de Mercedes-Benz (para el control del fluido de la transmisión en el calentamiento del motor) y para el control de los cierres de protección de las luces de niebla [9].

Los actuadores eléctricos han intentado sustituir a motores eléctricos y solenoides. Controlando la potencia durante la actuación eléctrica, pueden mantenerse posiciones específicas o niveles de fuerza específicos. Se han usado en válvulas y, últimamente integrados en composites para atenuar ruidos en estructuras y control de vibraciones [10]. Las mayores limitaciones son las temperaturas de transformación y la falta de control en el tiempo de enfriado. Para trabajar adecuadamente, se necesita que  $M_f$  sea mucho más alta que la temperatura operativa.

Los actuadores que más se han comercializado con éxito tienen una  $M_f$  de  $70^{\circ}\text{C}$ . Su aplicación como microactuadores térmicos en mecanismos de actuación tienen grandes ventajas: no requieren otro elemento más que el propio SMA, gran versatilidad en diseño a tracción, compresión o flexión, son silenciosos, limpios, con posibilidad de trabajar en ambientes inflamables y el ratio potencia/volumen es relativamente alto. Sin embargo, la eficiencia energética es baja, el ancho de banda está limitado por restricciones en enfriamiento y calentamiento, y pueden sufrir degradación y fatiga. Las aplicaciones donde se han usado como microactuadores son en sensores actuadores: cafeteras, válvulas termostáticas, etc. Las aplicaciones más extendidas en los últimos años son aquellas que precisan de la característica de superelasticidad: antenas de móviles, monturas de gafas o como alambres dentales.

Donde realmente están resultado revolucionarias es en el campo de la biomedicina [11]. Se están aplicando en el guiado de alambres en cirugía por su flexibilidad y torsionabilidad y, más recientemente, en stents auto-expandibles (figura 8), así como en técnicas quirúrgicas con terapia mínimamente invasiva: localizadores de tumores (Mitek Masmmalok), introducción de herramientas de cirugía (grapas, agujas...) a través de una cánula, forceps, filtros de sangre, filtros de vena cava, placas intracraneales, o en aplicaciones ginecológicas (estrangulamiento de trompas de Falopio).

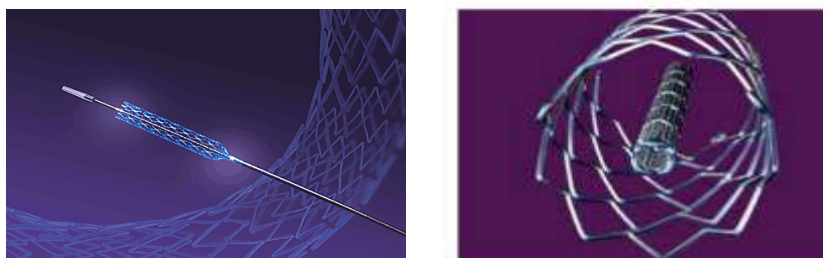


Figura 8. Stent autoajustable de Nitinol utilizado para ensanchar arterias y venas.



Otro ejemplo que muestra los últimos avances en medicina es una válvula que incorpora un anillo de nitinol para asegurar la unión de dos partes del colon cuando se practica alguna extirpación por cáncer (figura 9). Cuando aumenta la temperatura de la aleación, el anillo se abre y se libera de la unión que ya está totalmente cicatrizada. El esquema del anillo y la figura explicativa se muestran a continuación:

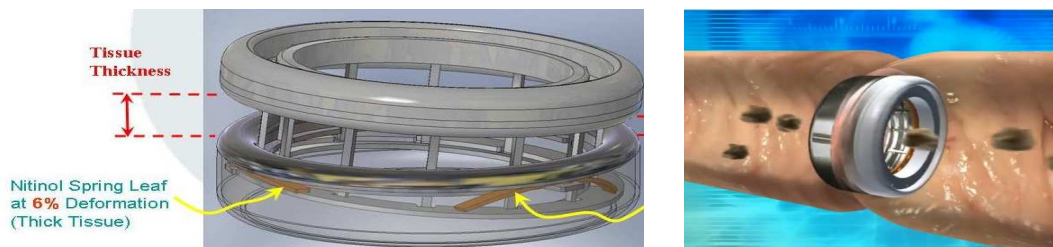


Figura 9. Colon ring utilizado en extirpaciones de colon.

Pese a que todo lo anterior existen todavía muchas limitaciones que hacen que sea necesario profundizar en el diseño y modelización de las SMA. La mayoría de las aplicaciones explicadas se han desarrollado por métodos experimentales (prueba y error). En otros casos, como en el caso de patentes basadas en actuadores, el principio del funcionamiento es prácticamente el mismo, sin innovación en lo referente al diseño de la pieza en SMA. Existe una falta de herramientas de cálculo para estas aleaciones, además es difícil y económicamente inviable, desarrollar elementos de formas más complejas. Otras muchas aplicaciones no han evolucionado debido principalmente al alto coste del material (generalmente NiTi). Además, el campo de las aleaciones con memoria de forma está básicamente centrado a especialistas en el tema, y la divulgación de los conocimientos es escasa. Las publicaciones y los estudios de las aleaciones con memoria de forma son tremendamente dispersos y variados, y principalmente existe una normativa de estandarización limitada que determinen las características del material. En la actualidad existen únicamente normas japonesas y americanas [12][13], pero no existe una normativa detallada a nivel europeo. Se necesita una caracterización de los materiales por determinación experimental y una generalización del modelado constitutivo de estas aleaciones. El propósito de conocer en detalle las características de estas aleaciones es promover la aparición de nuevos diseños, nuevas ideas y aplicaciones realmente interesantes de las aleaciones con memoria de forma.

#### 1.4.8 Aleación elegida

Ya se ha explicado en el apartado 1.4.5 las ventajas que ofrece la aleación de Ni-Ti frente a la de CuZnAl, que se comercializan en la actualidad. Es por ello que se elige dicho material, en concreto se ha adquirido nitinol con el nombre comercial Flexinol, de la casa DYNALLOY, INC. La aleación se suministra en forma de hilo en carretes de distintos diámetros (figura 10). Se usarán diámetros entre 0.13 y 0.51 mm que cumplen los requisitos de fuerza y deformación necesarios, para estudiar su comportamiento e implementarlo en el prototipo.



Figura 10. Carrete utilizado de cable de nitinol, 0.51mm (0.020") de diámetro.



### 1.4.9 Propiedades y comportamiento de la aleación

A continuación se muestran las propiedades físicas y eléctricas de la aleación de nitinol adquirida (tabla 2).

1. Density	0.235 lb/in <sup>3</sup> (6.45 g/cm <sup>3</sup> )
2. Specific Heat	0.20 BTU/lb * °F (0.2 cal/g * °C)
3. Melting Point	2370 °F (1300 °C)
4. Latent Heat of Transformation	10.4 BTU/lb (5.78 cal/g)
5. Thermal Conductivity	10.4 BTU/hr * ft * °F (0.18 W/cm * °C)
6. Thermal Expansion Coefficient	
Martensite	3.67x10 <sup>-6</sup> /°F (6.6x10 <sup>-6</sup> /°C)
Austenite	6.11x10 <sup>-6</sup> /°F (11.0x10 <sup>-6</sup> /°C)
7. Electrical Resistivity (approx.)	
Martensite:	32 micro-ohms * in (80 micro-ohms * cm)
Austenite:	39 micro-ohms * in (100 micro-ohms * cm)

Tabla 2. Principales características aleación nitinol utilizada.

La densidad de la aleación es elevada a su composición formada de aproximadamente 50% de níquel. La adición de titanio disminuye la densidad a 6540 Kg/m<sup>3</sup>, aunque es elevada y muy cercana a la del acero (7850 Kg/m<sup>3</sup>). Se usan cables de aleación de un máximo de 0.51 mm de diámetro y longitudes de no más de 50 cm para realizar las primeras pruebas del prototipo. Se calcula el peso de un cable:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$V = L \cdot A$$

$$peso = \rho \cdot V$$

Ecuación 1. Cálculo peso cable nitinol.

Donde:

L = longitud del cable (max. 500 mm)

A = sección cable

d = diámetro cable (max. 0.51 mm)

$\rho$  = densidad aleación (6450 kg/m<sup>3</sup>)

$$A = \pi \cdot \frac{0.51 \cdot (10^{-3})^2}{4} = 2.004 \cdot 10^{-7} m^2$$

$$V = 0.5 \cdot 2.004 \cdot 10^{-7} = 1.02 \cdot 10^{-7} m^3$$

$$peso = 0.668 \text{ gramos}$$

Se puede considerar despreciable el peso que supone el cable de nitinol. Se trata de una ventaja del nuevo sistema de accionamiento, que trata de reducir peso y dimensiones.

La conductividad térmica de la aleación es de 18 W/m·°C, parecida a la del acero inoxidable (14-15 W/m·°C). Por lo tanto su capacidad para conducir el calor se puede considerar buena. En el proceso de calentamiento se puede garantizar una buena





velocidad de calentamiento, como se muestra en la tabla siguiente y como asegura el fabricante, se puede alcanzar los 100°C en 1 milisegundo aplicando picos de corriente suficientemente grandes.

Otro dato importante (tabla 3) es el tiempo de enfriamiento del cable de nitinol. Este tiempo está directamente relacionado con la fuerza que produce y el diámetro. En este caso usaremos un cable de un diámetro grande para conseguir alta fuerza durante la transformación austenítica. El principal inconveniente es el tiempo de enfriamiento, superior a los 10 segundos. Como propone el fabricante y como se propone al final del proyecto, es necesario unir el cable con un material con alta conductividad térmica, para conseguir un enfriamiento por conducción rápido. Si el enfriamiento se produce por convección con aire estacionario, el flujo es muy pequeño y los tiempos corresponden con los mostrados en la tabla. Sólo sería viable utilizar un cable de pequeño diámetro, que garantiza rápidos enfriamientos (rápida transformación martensítica), pero que no ofrece fuerza suficiente en su transformación austenítica.

La resistencia eléctrica de la aleación es muy reducida, del orden de micro ohmios. Como se muestra en la tabla 3, los cables de nitinol admiten un valor aproximado de 4 amperios de corriente continua. Una resistencia eléctrica baja, garantiza en este caso un consumo reducido de potencia de menos de 35W como se demuestra a continuación:

$$P = I^2 \cdot R' \cdot L$$

Ecuación 2. Potencia consumo nitinol.

Donde:

$$I = 4A \text{ max}$$

$$R' = \text{resistividad cable } 0.51\text{mm diámetro } (4.3 \Omega/m)$$

$$L = \text{longitud cable (max 50 cm)}$$

$$P = 4^2 \cdot 4.3 \cdot 0.5 = 34.4W$$

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C “LT” Wire *** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C “HT” Wire *** (seconds)
0.001 (0.25)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.38)	22.6 (890)	0.04 (20)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	200	1.1	0.9
0.005 (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4000	16.8	14.0

Tabla 3. Características eléctricas y térmicas cables de nitinol según diámetro.



En la figura 11 se muestran la relación temperatura-deformación para dos aleaciones con diferente umbral de temperatura entre las fases austenítica y martensítica de 70 °C y 90 °C. De la gráfica se puede identificar el comportamiento poco lineal del material. A partir de una temperatura 80 y 100 °C el cable experimenta una contracción brusca y se produce la transformación austenítica de manera inmediata. De la misma manera, la transformación martensítica durante el enfriamiento es brusca. Por eso, el control de la deformación del cable a través de la corriente eléctrica (calor) es difícil de conseguir, pues la regulación de la temperatura es siempre un proceso lento. De esta gráfica se deduce que el control tiene que ser muy preciso, y trabajar con el material en un rango de temperaturas muy pequeño, de manera precisa. Se necesita cerrar el ciclo de control en un tiempo muy pequeño, y permanecer en la zona plana (A-B) de la gráfica durante el calentamiento y el enfriamiento.

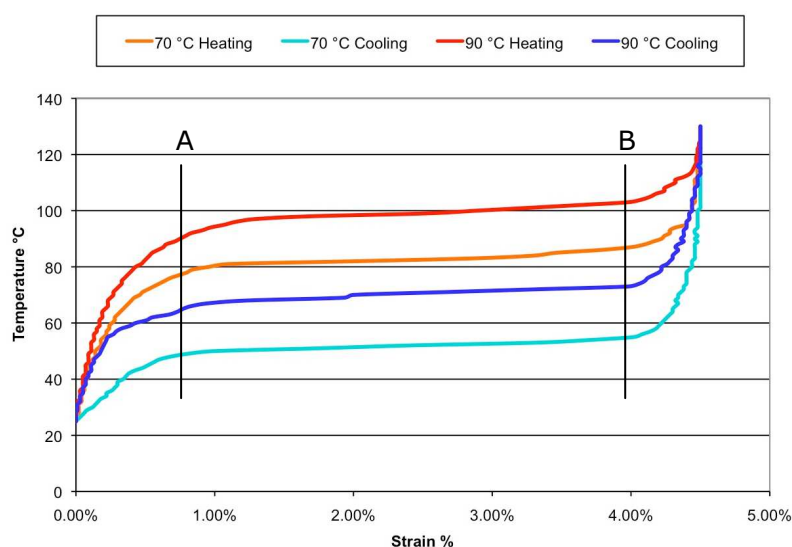


Figura 11. Evolución de la deformación del nitinol con la temperatura.

Para conseguir una recuperación de la forma inicial se necesita aplicar una tensión en el sentido opuesto a la deformación (tabla 4). Con esta tensión se acelera además el proceso de enfriamiento.

Presión (Mpa)	Recuperación deformación
25	3%
60	4%
105	5%

Tabla 4. Relación presión – recuperación deformación de la aleación de nitinol.

Una de las posibles configuraciones es colocar un muelle en el extremo del cable de nitinol (figura 12), de tal manera cuando que se contrae el cable, la fuerza del muelle sea mínima, y durante el enfriamiento, la fuerza del muelle sea suficiente para acelerar la recuperación de la forma. Según el fabricante se consigue un 3% aproximadamente de elongación del cable con esta configuración.

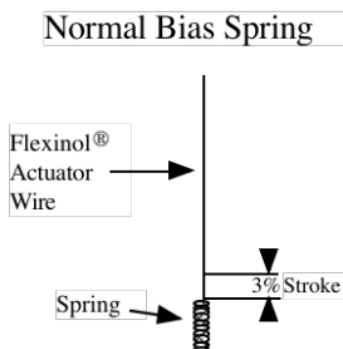


Figura 12. Posible configuración nitinol con muelle en extremo.

## 1.5 Manos robóticas

Como ya se ha comentado en el primer capítulo, el sistema de accionamiento de una mano robótica, ha sufrido pocas evoluciones. En este apartado se muestran distintas manos robóticas y su evolución con los años, haciendo especial referencia a sus sistemas de accionamiento.

### 1.5.1 Mano Belgrade/Usc (1969)

La mano robótica Belgrado/USC (figura 13) fue diseñada por la Universidad del Sur de California y la University of Novi-Sad at Belgradetiene (por ello su nombre). Tiene cuatro dedos, cada uno con tres ejes y un GDL (Grado de Libertad) que permite la flexión de todas las articulaciones de la unión. Esta configuración disminuye la destreza de la mano. Cada par de dedos adyacentes es manejado por un solo motor el cual actúa en los pares más próximos a los nudillos. Un sistema de conexión separada en cada dedo transmite la potencia a las articulaciones más distantes. Un mecanismo de brazo balanceado acopla dos pares de dedos mecánicamente. La mano es controlada usando una estrategia PD (proporcional derivativo) simple con un microcontrolador 332, ya obsoleto. Esta mano no posee sensores táctiles pero incorpora doce sensores de fuerza (USC Robotics Research Lab).



Figura 13. Mano Belgrade/Usc (1969).

### 1.5.2 Mano Stanford/Jpl (Salisbury) (1981)

El sistema conecta cuatro cables de acero flexible recubiertos de teflón que se salen desde un servo motor en cada uno de los tres dedos con 3 grados de libertad (figura 14). De esta manera, la mano es capaz de adherir configuraciones de  $N+1$  tendones, en los cuales,  $N+1$  cables y motores son requeridos para  $N$  grados de libertad. El ensamblaje para manejarlo es torpe y los cables flexibles que se utilizan



para su construcción son de limitada fiabilidad y capacidad de transmisión de potencia. El sistema de tensión del cable, está basado en sensores de fuerza que aseguran un control exacto de fuerza en los dedos (USC Robotics Research Lab).



Figura 14. Mano Stanford/Jpl (Salisbury) (1981).

### 1.5.3 Mano Utah/Mit Dextrous (1982)

Esta mano posee dedos con 4GDL, aunque con un diseño no antropomórfico desde los nudillos (figura 15). La inclusión de tres dedos minimiza la dependencia de la fricción y añade un soporte redundante para las 18 tareas de manipulación. Cada dedo con N-GDL es controlado por 2N actuadores independientes y cables de tensión como tendones. Estos tendones son parte de un complejo sistema de manejo de cables proporcionado por 32 cilindros de vidrio neumáticos especialmente diseñados y válvulas de tubo tipo jet. Los sensores de rotación de efecto hall montados en cada articulación de cada dedo transmiten la medida del ángulo de la articulación. Aunque los dedos permiten una elevada ejecución dinámica, con sensores de fuerza para trabajo excesivo de 7 Kg y componentes de frecuencia que exceden los 20 Hz, su implementación es compleja (Laboratorio de robotique de l'Université Laval).



Figura 15. Mano Utah/Mit Dextrous (1982).

### 1.5.4 Mano robot Matsuoka (1995)

Esta mano robótica fue construida en el laboratorio de Inteligencia Artificial de MIT (figura 16). Cada dedo está compuesto de dos falanges y dos juntas articuladas. Estas articulaciones son controladas por un sistema cable/polea motor que imparte 2 GDL al dispositivo y es capaz de generar un par equivalente a 0.22 Kg en las yemas. La fuerza y precisión reducidas de estos dedos son aceptables porque los objetivos de la mano Matsuoka es la simulación de movimientos para manipulación (Wired science).



Figura 16. Mano robot Matsuoka (1995).

### 1.5.5 Mano Robonaut (1999)

Esta mano robótica fue diseñada para combinar tamaño, cinemática y fuerza de la mano de un astronauta. Por un lado el set de trabajo para la manipulación diestra incluye dos dedos con 3-GDL; y por otro lado el set de agarre estable incluye dos dedos con 1-GDL (figura 17). Un eje flexible de acero inoxidable acoplado a un motor DC sin escobillas alojado en el antebrazo transmite la potencia a cada uno de los dedos. Los dedos de agarre tienen tres articulaciones de flexión que cierran con aproximadamente ángulos iguales sobre un rango de  $90^\circ$ . Debido a la geometría compleja de la mano, muchas de sus partes fueron moldeadas en aluminio directamente. Los sensores de posición absoluta están embebidos en cada articulación de la mano, encoders incrementales sobre los motores, celdas de carga y sensores táctiles proveen la realimentación de posición y fuerza para el control (How Staff Works).



Figura 17. Mano Robonaut (1999).

### 1.5.6 Mano DLR (2000)

La mano DLR es una mano articulada multisensor con cuatro dedos, controlada por un guante de datos. Está diseñada con actuadores lineales integrados en la palma y en la falange proximal que permiten manipular las articulaciones de los dedos (figura 18). Cada dedo tiene una articulación de base de 2-GDL capaz de flexionar  $\pm 45^\circ$  y  $\pm 30^\circ$  de abducción/aducción, un nudillo de 1-GDL capaz de flexionar  $115^\circ$  y una articulación distal capaz de flexionar  $110^\circ$ . La articulación distal es manejada pasivamente debido al acoplamiento inter-articulaciones.

El control de posición, fuerza y rigidez es llevado a cabo por un medidor de fuerza basado en sensores de par, sensores ópticos de posición de las articulaciones y sensores táctiles [service-robots.org].



Figura 18. Mano DLR (2000).

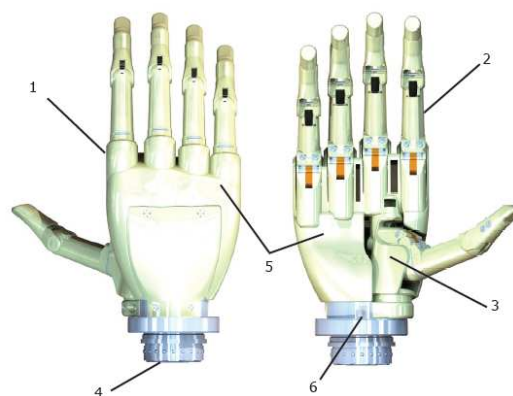
### 1.5.7 I-Limb Hand (2003–2009)

Se trata de la prótesis biónica comercial más vendida. Desde la primera versión en 2003, más de 1000 pacientes la utilizan para tareas sencillas en su vida diaria. La última versión de 2009 tiene 5 dedos con 2-GDL cada uno. El sistema motor-transmisión se integra en cada dedo (figura 19).



Figura 19. Sistema articulación de un dedo. I-Limb Hand.

La novedad de la mano, es el sistema de sensorización mioelectrónico. Se basa en dos electrodos que reciben cualquier mínimo impulso a través del muñón del paciente. Estas señales procedentes de los músculos que llegan al extremo del muñón, se amplifican y se reconocen. De esta manera con el software que la empresa facilita, se pueden crear y memorizar movimientos sencillos (dar la mano, coger una pelota, una jarra, él móvil, etc.).



1. Nudillo
2. Dedo motorizado
3. Rotor del pulgar
4. Desconexión rápida de la muñeca
5. Carenado
6. Interruptor ENCENDIDO/APAGADO

Figura 20. Partes fundamentales I-Limb Hand.

### 1.5.8 Mano Shadow Dexterous C6M (2009)

Se trata de la mano robótica similar a la humana más avanzada actualmente. Pertenece a la compañía Robot Shadow Company y es la utilizada para realizar las investigaciones relativas al proyecto Handle (figura 21). Dispone de 24 grados de libertad, que intentan reproducir fielmente los movimientos y aspecto de una mano real. Utiliza 20 motores de corriente continua para mover cada una de las articulaciones aplicados a un sistema de engranajes y un par tensores a modo de tendones que mueven cada dedo en uno u otro sentido.

La comunicación se realiza desde un PC con una tarjeta parallel-to-CAN. Integra un microcontrolador PIC que gestiona la red local CAN bus. Cada motor lleva acoplado un sensor de fuerza y un sensor de giro de efecto hall. Ambas medidas son enviadas a través de CAN bus para poder realizar el control del sistema.



Figura 21. Mano Shadow Dexterous C6M (2009).







## 2 Estado del arte

---

Estudios y aplicaciones del nitinol como sistema de accionamiento.

Los cables de nitinol representan una excelente alternativa a los actuadores convencionales, con una fuerza de actuación muy alta, equivalente a la de los actuadores hidráulicos, proporcionalmente a su peso, además de su acción silenciosa. Ciclos repetidos de un 3% de deformación con una tensión de 200 MPa producen más de un julio de trabajo de salida por ciclo, lo que se encuentra entre las mayores densidades de trabajo conocidas. Su peso y tamaño son considerablemente inferiores a los de los actuadores utilizados hoy en día, además de que su fuerza de recuperación por unidad de peso es mucho mayor que la ejercida por otros tipos de mecanismos de actuación [14].

Los motores eléctricos trabajan a grandes velocidades y producen torques pequeños, así que requieren la adaptación de sistemas de reducción para generar la potencia necesaria para una tarea específica. Por este motivo se incrementa el peso y la complejidad para configurar un sistema, además de elevar la fricción y el ruido.

Los actuadores hidráulicos y neumáticos son mucho más livianos que los motores eléctricos, sin embargo, requieren de sistemas de bombas, cabinas presurizadas, tubos y válvulas para detener el fluido de trabajo, lo que lleva casi siempre a sistemas más complejos para alcanzar un mismo objetivo. Estas configuraciones mecánicas tienden a generar mucho ruido y a presentar fugas que entorpecen su funcionamiento.

Todas estas ventajas despiertan interés en la investigación y estudio de la aleación de nitinol y su aplicación como sistema accionamiento.

## 2.1 Estudios existentes

Ya se han comentado en el apartado 1.4 y en el anterior, las principales ventajas que aporta el uso de este material. Para desarrollar el prototipo y conducir la investigación en la dirección correcta, es necesario conocer los problemas existentes e inconvenientes de un sistema de accionamiento basado en nitinol. Para ello se analizan estudios teóricos, investigaciones y prototipos realizados para conocer las principales características del sistema y sus limitaciones.

Hirose [15] diseñó un actuador que empleaba una configuración de los elementos SMA llamada  $\xi$ -array. En esta configuración los elementos activos, que consisten en un conjunto de muelles helicoidales, están conectados eléctricamente en serie. Estos muelles trabajan mecánicamente en paralelo contra un pistón móvil. La configuración  $\xi$ -array fue utilizada por Ikuta [16] en el desarrollo de un servomotor basado en el uso de SMAs. Este sistema usa la resistencia eléctrica como realimentación para controlarlo ya que esta varía con el porcentaje de austenita en la aleación, y por tanto varía con la temperatura. Con este servomotor se fabricó un endoscopio activo.

El uso de la propia resistencia del cable para la realimentación, no es viable. La variación de la resistencia con la deformación del material no es lineal y no permite un control preciso (figura 22). Así lo demuestra en un estudio de la universidad politécnica de Valencia [17].

Los controles clásicos PI, PD y PID han sido estudiados por Madill y Wang (1998), Reynaerts y Van Brussel (1991) e Ikuta et al. (1988). Específicamente, Ikuta et al. (1988) usaron un sistema de control PID con una señal de salida PWM (modulada por ancho de pulso) [18].

Luego, Troisfontaine et al. en 1997 estudiaron un controlador PI que incluía una realimentación de temperatura. En ese mismo año, Grant y Hayward, usando un control de estructura variable (VSC) con modulación discreta de corriente, controlaron un par de actuadores de nitinol antagonistas compuestos por múltiples fibras organizadas en un patrón helicoidal, de tal manera que se lograra superar los límites

de deformación de las fibras de nitinol y su velocidad de actuación. El control usaba la señal de realimentación para corregir el error de desplazamiento, y ajustar el valor de la corriente según la posición. Así lograron diseñar un control preciso con una baja complejidad relativa [19].

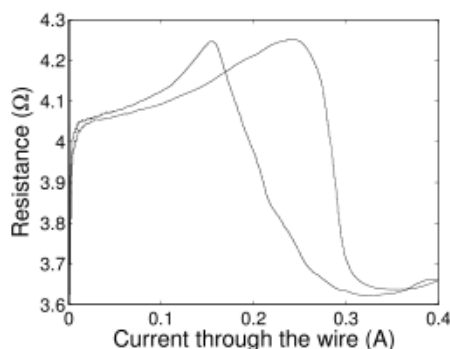


Figura 22. Variación resistencia nitinol con la temperatura.

Kuribayashi diseñó un actuador formado por dos alambres de Nitinol. Para este sistema desarrolló un modelo matemático tanto del mecanismo de actuación como del sistema de control y demostró la validez de estos modelos con una serie de pruebas experimentales [20].

H. Meier y L. Oelschlaeger han mejorado los modelos termomecánicos del material y con capaces de prever el estado del material durante las fases martensítica y austenítica. Han sido capaces de simular el comportamiento del nitinol de manera precisa y poder realizar simulaciones en tiempo real, para crear algoritmos futuros de control de actuadores. Como conclusión se puede asegurar la estabilidad del ciclo de histéresis a lo largo de numerosas repeticiones [21](figura 23).

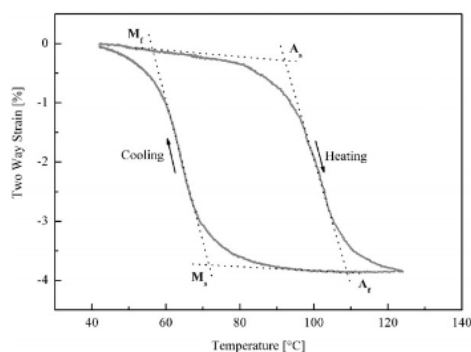


Figura 23. Ciclo de histéresis característico del comportamiento del nitinol.

El pequeño robot hexápodo GJ-M y otros robots similares utilizan alambres de Nitinol como músculos para generar el movimiento de las patas (figura 24 y 25). Estos alambres sustituyen a los motores como elementos generadores de movimiento permitiendo el diseño de robots pequeños, ligeros y silenciosos [22][23].

En los últimos años se están llevando a cabo varias investigaciones acerca del uso de actuadores de Nitinol como músculos artificiales para manos robóticas. Chaudhuri y Fredericksen propusieron algunos diseños de músculos para manos robóticas hechos de aleaciones con memoria de forma.

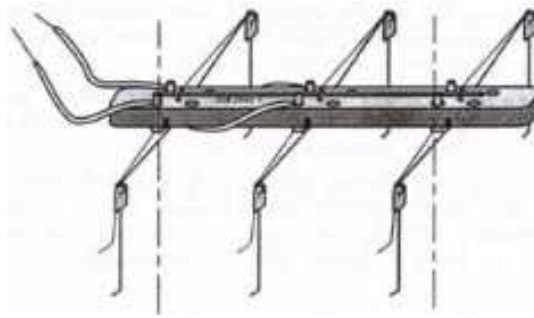


Figura 24. Sistema motriz con alambres musculares.



Figura 25. Robot hexápodo GJ-M.

Reynaerts y H. Van Brussel han realizado propuesto un sistema de accionamiento para manos robóticas basado en un cable de nitinol unido a una polea y sometido a la tensión de un muelle. Este prototipo similar al propuesto en el presente proyecto, realiza un control PID de la posición (figura 26) y aunque realiza un control preciso, no soluciona los problemas de enfriamiento del material, que se mantiene superior a los 3 segundos de media [24](figura 27).

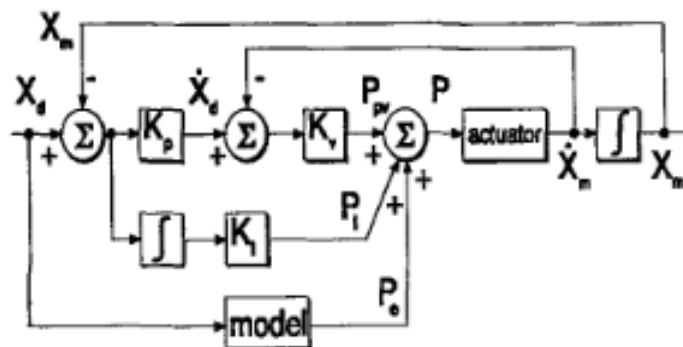


Figura 26. Control de posición PID con prealimentación.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los aspectos más importantes que hay que tener en cuenta al diseñar actuadores de Nitinol es la fase de enfriamiento. En la fase de calentamiento el material responde muy rápido. Hashimoto [25] consiguió, para un alambre de Nitinol de 1 mm de diámetro y 200 mm de longitud, una velocidad de contracción de 0.03 m/s con una potencia de entrada de 200 W. Sin embargo la respuesta del actuador es lenta al enfriarse. La relación de enfriamiento es proporcional a la relación entre la superficie del material y su capacidad calorífica. Además la velocidad de enfriamiento depende mucho del método de refrigeración empleado.



Hashimoto realizó varias pruebas de refrigeración con un alambre de Nitinol de 0.8 mm de diámetro empleando varios métodos de refrigeración como el enfriamiento en aire, ventilación, enfriamiento con agua y disipadores de calor, mostrando que el mejor rendimiento se obtiene mediante el uso de disipadores, con una relación de enfriamiento de 21 °C/s. Hashimoto utilizó este método de refrigeración en un actuador consistente en un elemento activo de Nitinol sujeto a un muelle, para la pierna de un robot bípedo.

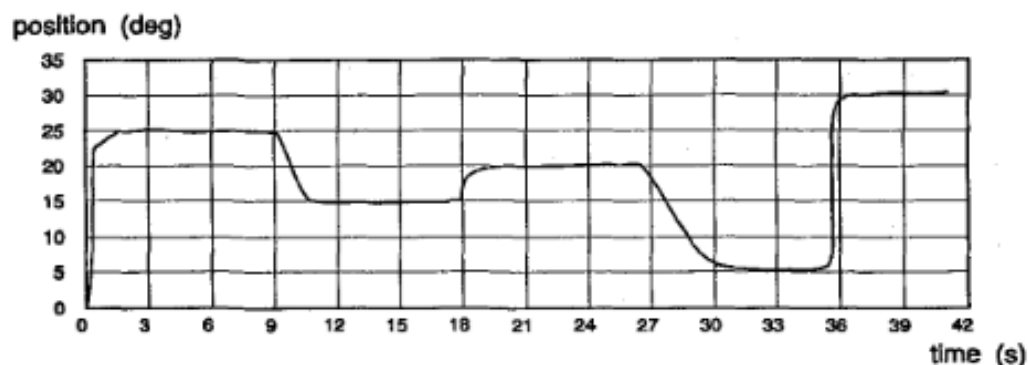


Figura 27. Resultado control de posición. Se observa un claro retraso durante la recuperación de forma en el proceso de enfriamiento.

Otros autores se han enfrentado al problema de la baja velocidad de enfriamiento del Nitinol, que reduce el ancho de banda del mismo. Bergamasco [26] diseñó un motor lineal que utiliza como elementos activos dos muelles de Nitinol en una configuración push-pull. Este sistema emplea un circuito de enfriamiento por agua. Con este dispositivo lograron frecuencias de funcionamiento de entre 1 Hz y 2 Hz, mayores que lo que se había conseguido hasta entonces para configuraciones similares [27][28].

Reynaerts y Brussel diseñaron un actuador de alto rendimiento para las articulaciones de una mano robótica. Para lograr que el enfriamiento fuese más rápido utilizaron alambres de Nitinol de sección rectangular, lo cual mejora la transferencia de calor al tener mayor superficie. Además su sistema usaba refrigeración mediante aceite. Con este actuador lograron frecuencias de funcionamiento por encima de los 2 Hz, pudiendo aumentarse mediante el uso de otros refrigerantes [29].

O. K. Rediniotis y D. C. Lagoudas [30] demostraron que pueden obtenerse frecuencias de funcionamiento superiores a 20 Hz al utilizar actuadores SMA consistentes en una fina capa del material, de unos 6 µm de grosor. Además dejaron una puerta abierta a la obtención de anchos de banda de entre 50 Hz y 100 Hz utilizando refrigeración activa y haciendo que el SMA no realice una transformación de fase completa.

D. D. Shin [31] obtuvo frecuencias de trabajo de hasta 100 Hz con una bomba hidráulica compacta que usa como elemento activo una membrana de Nitinol de 10 µm. El flujo de líquido que bombea el dispositivo funciona como refrigeración activa, permitiendo obtener los anchos de banda predichos por Rediniotis.

Otra solución para el problema de la velocidad de enfriamiento es la propuesta por I. W. Hunter [32]. En vez de utilizar un sistema de refrigeración, modificaron las propiedades del Nitinol aplicando pulsos muy breves de corriente muy elevada al mismo tiempo que sometían el material a ciclos de estiramiento y encogimiento. Con este método consiguieron reducir el tiempo de enfriamiento de aproximadamente 1 s a 300 ms para un alambre de Nitinol de 0.8 mm de diámetro y 100 mm de longitud.

## 2.2 Conclusiones

Según los estudios analizados se conocen los factores fundamentales a tener en cuenta para el diseño del actuador.

Es necesario un estudio en detalle del comportamiento termodinámico del sistema, haciendo hincapié en la velocidad de enfriamiento y desarrollando sistemas nuevos de refrigeración que logren reducir este tiempo. Como primer paso en el actual proyecto se utiliza un muelle que ejerza tensión sobre el cable de nitinol para reducir este tiempo.

Durante las fases de deformación y recuperación del cable del ciclo de histéresis, los valores de las pendientes son muy elevados y un control proporcional requiere de una elevada frecuencia de control. El comportamiento del nitinol se puede comparar con un comportamiento todo-nada, donde realizar un control proporcional es difícil. El tiempo de deformación en el proceso de calentamiento es del orden de milisegundos, por tanto, el ancho de banda (sin tener en cuenta la limitación del enfriamiento) debe de ser elevado y del orden de Khz.

El control de posición está limitado por el tiempo de enfriamiento cuando el actuador tiene que volver a una posición anterior. Considerando un control de sólo una posición en concreto, se han obtenido niveles de éxito bastante aceptables con sistemas de control sencillos, que usando variables dependientes del material y las condiciones ambientales, consiguen errores de posición menores del 1%, comparables con los sistemas convencionales de actuación. Para lograr errores de este orden se necesitan mediciones precisas de las variables que dependen de manera lineal con el cambio de forma del nitinol.

Se han realizado modelos del ciclo de histéresis del material, conociendo los valores de temperatura en cada instante. De manera práctica no se ha intentado, porque no es viable realizar un control en función de la variable temperatura. La medición directa de la temperatura no se consigue realizar de manera rápida con ningún sensor. Se puede realizar el control midiendo la deformación del nitinol de manera directa o a través del desplazamiento del actuador, que si son variables lineales fácilmente medibles. El problema mayor es conseguir acoplar un sensor al actuador, cuyo tamaño y peso sean mínimos, y que no introduzca ruidos ni rozamiento en el sistema.



## 3 Diseño del prototipo

---

Introducción a la solución planteada y explicación detallada de cada sistema.



En este capítulo, se especifican los requerimientos que debe cumplir el nuevo sistema de accionamiento, se detalla la solución buscada y el funcionamiento de este primer prototipo.

El desarrollo del prototipo se divide en dos partes (figura 29):

- Una estructura mecánica para dar soporte al cable de nitinol, sensor, polea, eje y el resto de elementos del accionamiento.
- Un subsistema electrónico que incluye:
  - Etapa de potencia destinada a regular la corriente entregada al SMA.
  - Sensor de posición para leer la posición del eje.
  - Un microprocesador que se encargará de controlar el sistema y lograr que el eje siga las órdenes dadas por un PC.

### 3.1 Arquitectura general

Se utiliza una configuración cable-polea-muelle como sistema de accionamiento para producir el giro de la polea (figura 28). El objetivo es simular un grado de libertad correspondiente a un dedo real y con un giro de  $120^\circ$ . La polea lleva acoplado un sensor de giro que envía la posición instantánea al microcontrolador (PIC), que las recibe a través del puerto A/D (transforma señal de entrada analógica en digital). El microcontrolador envía los datos de posición recibidos al PC mediante el protocolo serie RS-232 en modo full-duplex y éstos se reciben a través de Matlab. El propósito es preparar el prototipo para desarrollar futuros algoritmos de control en Simulink. Una vez el algoritmo de Matlab analiza el error y calcula la señal de control, el microcontrolador la recibe y la envía en forma de salidas digitales al circuito regulador de corriente que suministra corriente eléctrica al cable de nitinol (figura 29).

En esta primera versión se desarrolla un modelo simple con un solo cable de nitinol, pero el objetivo futuro es controlar un sistema con dos cables de nitinol, cada uno con su correspondiente muelle (figura 30).

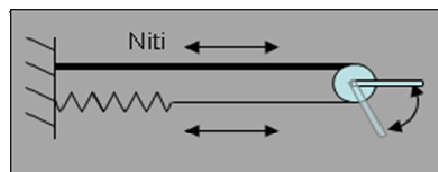


Figura 28. Sistema simple cable polea.

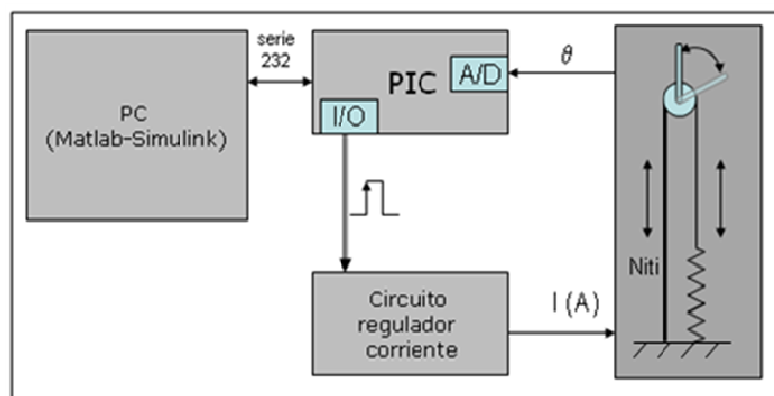


Figura 29. Esquema sistema completo actuador de nitinol.



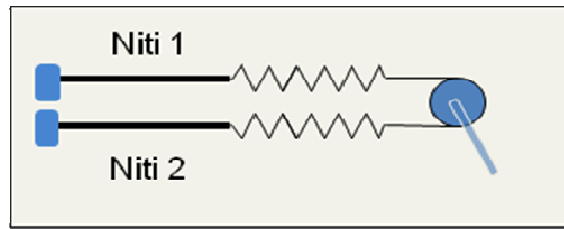


Figura 30. Modelo sistema con doble muelle y nitinol.

## 3.2 Diseño mecánico

Aunque se trata de un primer prototipo, hay que considerar los requisitos de forma, peso y dimensiones los más reducido posible, para poder ser integrado en cada grado de libertad de una mano robótica. Al mismo tiempo debe ser un sistema rígido, capaz de soportar las tensiones y esfuerzos de cada grado de libertad de la mano.

### 3.2.1 Ecuaciones del modelo

Como se ha explicado en apartados anteriores, la deformación del nitinol depende de la temperatura y no es lineal. Los valores de fuerza instantánea del cable no se pueden conocer de forma directa. Se realiza una estimación de las ecuaciones que definen el modelo, para explicar el funcionamiento del sistema teniendo en cuenta estas consideraciones, para el sistema simple con un cable de nitinol y un muelle (figura 31).

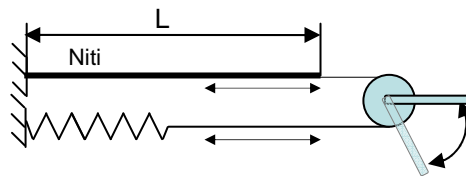


Figura 31. Esquema detalle sistema cable polea.

Se suponen tres estados de equilibrio que se repiten continuamente durante el control. Un estado inicial donde el muelle sufre una deformación inicial y la polea permanece en el punto inicial y en equilibrio (figura 32). Un estado siguiente durante el calentamiento del cable de nitinol donde el muelle se deforma una vez más, y se crea el movimiento (figura 33). El último estado es el enfriamiento del nitinol, donde la fuerza del muelle ejerce una fuerza de tracción al nitinol, y favorece el enfriamiento y recuperación de forma de éste (figura 34).

#### Estado inicial:

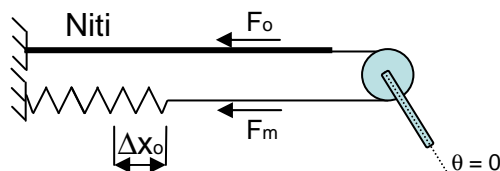


Figura 32. Esquema funcionamiento en el estado inicial.

$$F_o = F_{mo} = K\Delta x_o$$

Ecuación 3. Estado inicial sistema simple.

Donde:

$K$  es la constante elástica del muelle (N/m). Se calcula de manera experimental (apartado 3.2.2).

$\Delta x_o$  es el alargamiento inicial del muelle para que el sistema permanezca en equilibrio y estático. Se considera que no existe fricción, inercia rotacional ni fuerzas exteriores.

### Calentamiento:

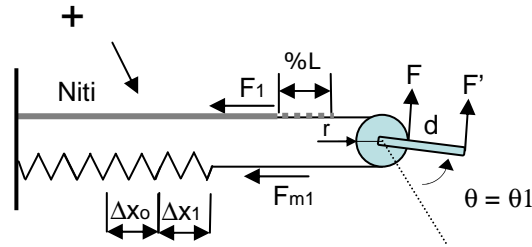


Figura 33. Esquema funcionamiento durante el calentamiento

$$F = F_1 - F_{m1}$$

$$F_{m1} = K \cdot (\Delta x_o + \Delta x_1)$$

$$M_1 = F' \cdot d = F \cdot r$$

$$F = F' \cdot \frac{d}{r}$$

Ecuación 4. Calentamiento sistema simple.

$$\Delta x_1 = 2\pi \cdot r \cdot \frac{\theta}{360}$$

Donde:

$F_1 = f(T)$  es la fuerza de tracción que desarrolla el cable al contraerse y depende de la temperatura. Se toma el valor máximo según los datos del fabricante.

%L es la contracción que sufre el cable de nitinol al aplicarle corriente eléctrica.

$\Delta x_1$  es el alargamiento del muelle que corresponde con la contracción que sufre el cable de nitinol al aumentar su temperatura que el sistema permanezca en equilibrio y estático.

F es la fuerza útil en el radio de la polea.

F' es la fuerza que se desea obtener en el extremo.

r es el radio de la polea

d es la distancia del centro de la polea al extremo del dedo.

$\theta_1$  es el ángulo girado durante el calentamiento

### Enfriamiento:

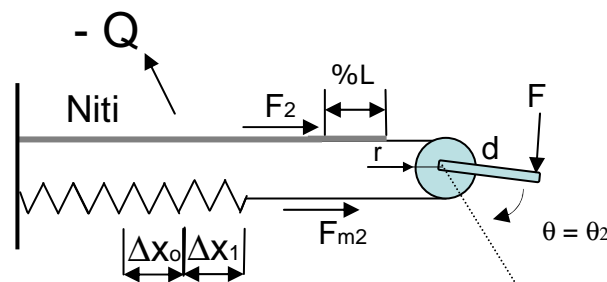


Figura 34. Esquema funcionamiento durante el enfriamiento.



$$F_2 = F_{m2} = K \cdot (\Delta x_0 + \Delta x_1)$$

$$M_2 = F \cdot d = F_2 \cdot r$$

$$\Delta x_1 = 2\pi \cdot r \cdot \frac{\theta}{360}$$

Ecuación 5. Enfriamiento sistema simple.

Donde:

K es la constante elástica del muelle (N/m). Se calculan de manera experimental (apartado 3.2.3).

$\Delta x_1$  es el alargamiento del muelle durante el calentamiento, que permite almacenar energía en el muelle, para ejercer una tracción sobre cable de nitinol durante el enfriamiento y así favorecer la recuperación de la forma.

### 3.2.2 Especificaciones técnicas

Una vez descritas las ecuaciones del sistema, hay que definir los valores de los parámetros de longitud del cable, radio de la polea y muelle a partir de las especificaciones que se quieren definir. En este caso se establece la fuerza a obtener en el extremo del dedo, a partir de los valores que ofrece la mano Dexterous de Shadow, que sirve de referencia. Para probar la validez del actuador diseñado, se toma como referencia la articulación de la mano Shadow Dexterous que ofrezca mayor capacidad para ejercer fuerza en el extremo del dedo (tabla 6). En este caso la articulación correspondiente es la THJ1 que ofrece 15.9 N.

Respecto a las dimensiones del dedo, se establece un valor de 100mm, según el tamaño medio aproximado de un dedo real. El ángulo de giro se establece en un máximo de 120°, a partir también de los valores que cumple la mano Shadow. También Se establece un valor de  $r=4$  mm, suficientemente pequeño, para cumplir con los criterios y aspectos similares a los humanos. No se han encontrado poleas comerciales de dimensiones inferiores.

Articulación	Máxima fuerza (N)
THJ1 (Flex.)	15.9
THJ2 (Flex.)	10.2
THJ3 (Flex.)	6.7
THJ5 (Flex.)	5.65
FFJ2 (Flex.)	9.4
FFJ3 (Flex.)	2.9
MFJ2 (Flex.)	7.3
MFJ3 (Flex.)	2.6
RFJ2 (Flex.)	8
RFJ3 (Flex.)	2.2
LFJ2 (Flex.)	6.3
LFJ2 (Flex.)	2.5

Tabla 5. Fuerza máxima de cada grado de libertad de la mano robótica Shadow.



Por tanto los valores establecidos o especificaciones a cumplir, son los siguientes:

Valor medio de la fuerza :  $F = 16 \text{ N}$

Distancia del centro polea al extremo dedo :  $d = 100 \text{ mm}$

$\theta_{\max} = 120^\circ$

$r = 4 \text{ mm}$

### 3.2.3 Dimensiones del cable de nitinol

Como se explicó en el apartado 1.4.9, con la configuración actual del sistema, con un muelle en el extremo del nitinol, se obtiene un 3% de deformación del cable. Se utiliza un cable de nitinol de máximo grosor de 0.51mm de diámetro, que según las tablas del fabricante desarrolla una fuerza de tracción de 3.56 Kg.

Ya se han establecido las especificaciones, por lo que se pueden aplicar las ecuaciones del apartado 3.2.1. del estado de calentamiento y se calcula la longitud del cable de nitinol (L).

A continuación se indican los valores de cada una de las variables:

$F_1 = 3.56 \text{ Kg} = 34.9 \text{ N}$  (según hoja de características para un cable de 0.51 mm diámetro).

$\%L = 0.03 \cdot L = \Delta x_1$

$F > 26 \text{ N}$  para cumplir las especificaciones

$d = 100 \text{ mm}$

$r = 4 \text{ mm}$

$\theta = 120^\circ$

$K = 400 \text{ N/m}$  en el peor caso. Es un valor sobredimensionado, a partir de los valores obtenidos de las constantes elásticas de los tres muelles disponibles (calculado en el apartado siguiente).

$\Delta x_0 = \Delta x_1$  se supone suficiente para que en el estado inicial, el sistema esté en equilibrio con mínima fuerza.

Se sustituye y calcula:

$$\Delta x_1 = 8.37 \text{ mm}$$

$$L = \frac{8.37}{0.03} = 280 \text{ mm}$$

$$F_{m1} = 400 \cdot (8.37 \cdot 2) = 6.7 \text{ N}$$

$$F = F_1 - F_{m1} = 34.9 - 6.7 = 28.2 \text{ N}$$

Por lo tanto se usa un cable de nitinol de 280 mm de longitud y 0.51mm de diámetro. De este modo la fuerza resultante disponible de manera aproximada es suficiente y cumple las especificaciones que se han establecido.

### 3.2.4 Sistema de amortiguación

Se estudian tres muelles con distintas constantes elásticas. Se trata de muelles de extensión de acero de 3, 6 y 9 mm de diámetro y longitudes según la norma DIN 2097. Como el fabricante no facilita el valor de la constante K, se calcula de manera experimental, mediante un sencillo ensayo. Se colocan distintos valores de masa en cada muelle para obtener un valor medio aproximado del valor de K (figura 35). Una

vez calculados se elige aquel muelle que mejor cumpla con los requisitos de tracción, para acelerar la recuperación de forma del cable de nitinol.

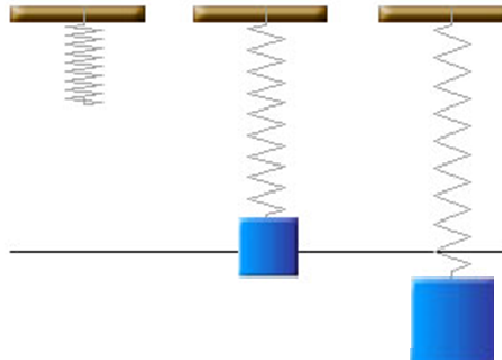


Figura 35. Esquema ensayo para cálculo K muelle.

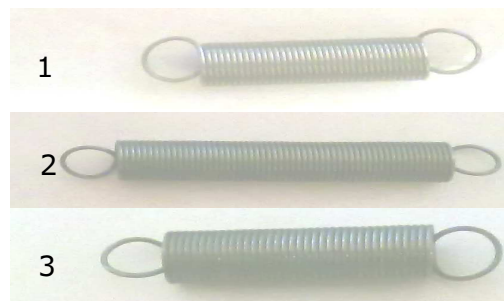


Figura 36. Muelles de 3, 6 y 9 mm de diámetro correspondientemente.

### Modelo muelle 1

masa (gr)	$\Delta x$ (mm)	$F_m$ (N)	$K$ (N/m)
125	7	1.23	175.18
250	13	2.45	188.65
320	21	3.14	149.49
400	31	3.92	126.58
500	45	4.91	109.00
800	63	7.85	124.57
1000	73	9.81	134.38

Figura 37. Resultados ensayo muelle 1.

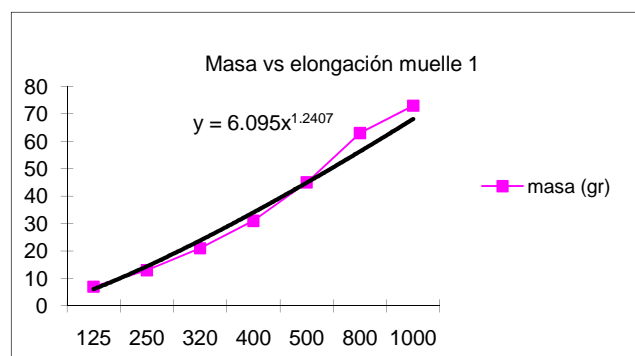


Figura 38. Relación deformación - fuerza muelle 1. Ajuste exponencial de la curva.



## Modelo muelle 2

masa (gr)	$\Delta x$ (mm)	Fm (N)	K(N/m)
125	2	1.23	613.13
250	11	2.45	222.95
320	23	3.14	136.49
400	35	3.92	112.11
500	50	4.91	98.10
800	77	7.85	101.92
1000	98	9.81	100.10

Tabla 6. Resultados ensayo muelle 2.

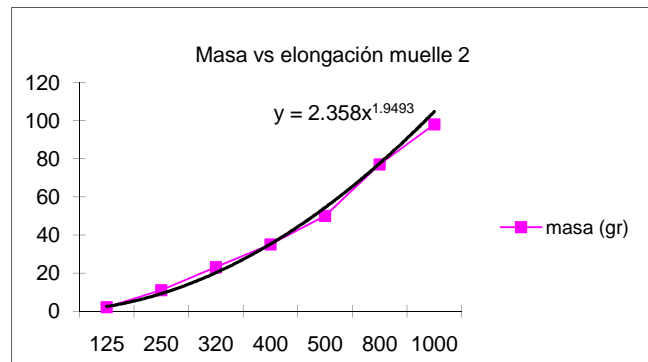


Figura 39. Relación deformación - fuerza muelle 2. Ajuste exponencial de la curva.

## Modelo muelle 3

masa (gr)	$\Delta x$ (mm)	Fm (N)	K(N/m)
125	1.5	1.23	817.50
250	8	2.45	306.56
320	10	3.14	313.92
400	16	3.92	245.25
500	22	4.91	222.95
800	34	7.85	230.82
1000	42	9.81	233.57

Tabla 7. Resultados ensayo muelle 3.

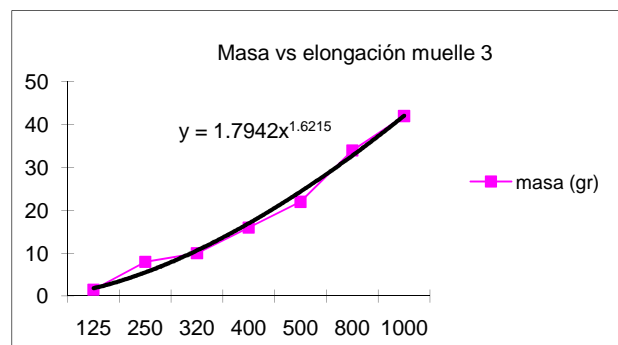


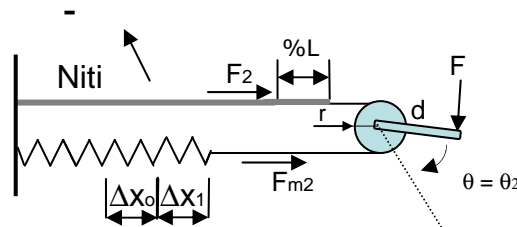
Figura 40. Relación deformación - fuerza muelle 3. Ajuste exponencial curva.

Se calculan los valores medios de cada constante elástica, como se muestran en la siguiente tabla:

	K medio (N/m)
muelle 1	144
muelle 2	128
muelle 3	258

Tabla 8. Valores medios constante elástica (K).

Según se explica en el apartado 1.4.9. el fabricante del cable de nitinol, recomienda aplicar una presión de tracción de 25 MPa sobre el cable para realizar de manera óptima la recuperación de la forma, en su transformación martensítica. Con esa presión se recupera un 3% de la deformación, que es la compresión del nitinol con la temperatura. Otra consideración es usar un muelle con la mínima constante elástica que aporte 25 MPa, que permita obtener una mayor fuerza neta del sistema. Se usa la ecuación 5 referente al estado de enfriamiento:



$$F_2 = F_{m2} = K \cdot (\Delta x_0 + \Delta x_1)$$

$$\frac{F_2}{A_{Niti}} > 25 \text{ MPa}$$

Dónde:

$\Delta x_0 = \Delta x_1$  se supone suficiente para que en el estado inicial, el sistema esté en equilibrio con mínima fuerza.

$\Delta x_1 = 8.37 \text{ mm}$  (calculado en el apartado anterior).

$A_{Niti}$  es la sección del cable elegido de 0.51mm de diámetro.

Se sustituye:

	Muelle 1	Muelle 2	Muelle 3
$F_2(\text{N})$	2.41N	2.14	5.47
$F_2/A_{Niti} \text{ (MPa)}$	11.81	10.49	26.82

Tabla 9. Presión ejercida por cada muelle.

$$A_{Niti} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2.04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$F_2 = F_{m2} = K \cdot (\Delta x_0 + \Delta x_1)$$

$$\frac{F_2}{A_{Niti}} > 25 \text{ MPa}$$

Se elige por tanto el muelle 3 de 9 mm de diámetro que cumple con el requisito y supera el valor teórico de 25 MPa de tracción sobre el cable de nitinol.

### 3.2.5 Sistema de eje, polea y rodamiento

Se diseña un sistema eje-polea que gira de forma solidaria (figura 41). El eje se encuentra apoyado sobre dos rodamientos de bolas para garantizar las mínimas pérdidas energéticas por fricción.

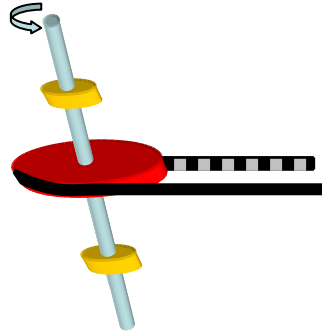


Figura 41. Esquema sistema eje-polea-rodamientos.

#### Eje

Se elige un eje de 2.38 mm diámetro, el más pequeño disponible y de material ligero (aluminio) (figura 42). La superficie está rectificada y se ofrecen tolerancias mínimas a lo largo de su superficie.



Figura 42. Eje rectificado ( $\Phi=2.3\text{mm}$  diámetro).

#### Rodamientos

Se eligen rodamientos de bolas de diámetro interior compatible con el eje modelo RJ-3332. El eje se monta mediante apriete dentro del diámetro interior de los rodamientos. El diámetro exterior se monta embutido en el soporte base (figura 43).

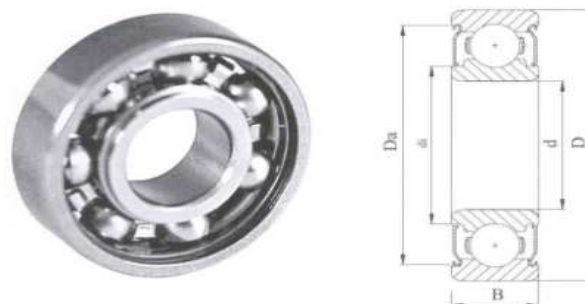


Figura 43. Rodamientos para eje de 2.3mm de diámetro.

Se comprueba que la máxima fuerza perpendicular al eje soportada es mayor a la máxima fuerza que desarrolla el cable de nitinol (figura 44).



$$F_{estática} > 35N$$

Ecuación 6. Fuerza perpendicular máxima.

$$59N > 35N$$

bore Ø d (mm)	outer Ø D (mm)	width B (mm)	JIS/ISO	NMB designation 	NMB designation 	Da (mm)	di (mm)	ball Ø (mm)	no. of ball bear.	Dyn. C (N)	Stat. C <sub>0</sub> (N)
1,0160	3,1750	1,1913	RI-2x2			2,56	1,64	0,63500	6	106	28
1,1913	3,9675	1,5875	RI-21/2			3,16	2,05	0,79375	6	158	44
1,1913	3,9675	2,3800			RI-21/222	3,43	2,05	0,79375	6	158	44
1,3970	4,7625	1,9837	RI-3			4,02	2,36	1,19062	5	264	71
1,3970	4,7625	2,7788			RI-322	4,29	2,36	1,19062	5	264	71
1,9837	6,3500	2,3800	RI-4			4,90	3,10	1,19062	6	330	99
1,9837	6,3500	3,5712			RI-422	5,23	3,10	1,19062	6	330	99
2,3800	4,7625	1,5875	RI-3332			4,13	3,00	0,79375	7	187	59
2,3800	4,7625	2,3800			RI-333222	4,28	3,00	0,79375	7	187	59
2,3800	7,9375	2,7788	RI-5			6,88	4,40	1,58750	6	563	183

Figura 44. Características rodamiento. Modelo elegido RJ-3332.

## Polea

Se eligen poleas mecanizadas de aluminio de 8mm de diámetro. Se montan solidarias al eje mediante un tornillo. La superficie del canal interior es rayada para aumentar el rozamiento de la polea con la correa (figura 45).

Figura 45. Polea con canal interior moleteado y acoplable a eje. ( $\Phi_{ext} = 8\text{mm}$ ;  $\Phi_{eje}=2.38\text{mm}$ ).

## Correa

Es importante elegir una correa que soporte las tensiones y que ofrezca buen rozamiento con la polea. La polea no debe ser elástica, pues disminuiría el ángulo útil de giro del sistema. Se usa un cable fino con cubierta de goma y de sección circular. Un extremo de la correa se une con el extremo del nitinol y el otro con el extremo del muelle.

### 3.2.6 Estructura de soporte

Se realiza un diseño 3D con el software Solid Edge, con el objetivo de fabricar el soporte de todos los elementos mecánicos. El soporte consta de las siguientes partes:

- Base rectangular.
- Dos soportes para sujeción del muelle y del cable de nitinol.



- Estructura para dar soporte al eje y a los rodamientos correspondientes. En la parte superior se aloja el sensor de giro, y en la inferior la polea y el dedo. Esta estructura está unida a la base.

En la siguiente figura se muestra el diseño creado:

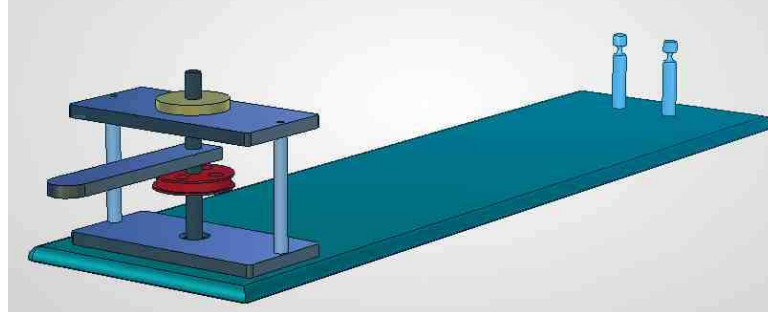


Figura 46. Diseño 3D de la estructura.

A continuación se muestra el conjunto explosionado (figura 47). Se observa en detalle el acople los rodamientos en el soporte. El disco situado en la parte superior simula el sensor de giro que se acopla en la estructura.

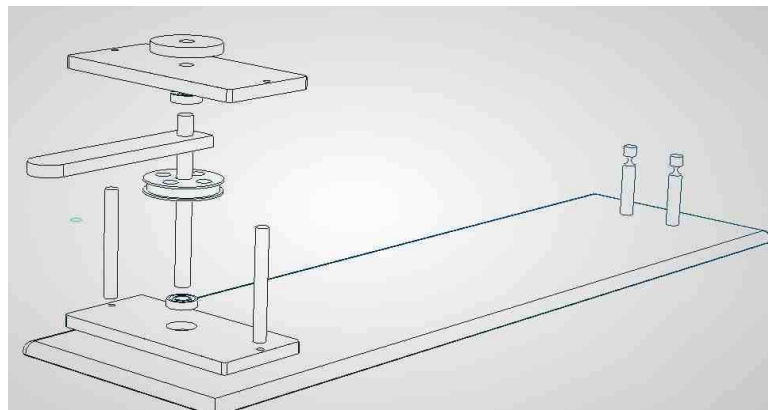


Figura 47. Diseño 3D explosionado estructura.

Por último se muestra un plano con el alzado, planta y perfil de toda la estructura y las medidas características (figura 48).

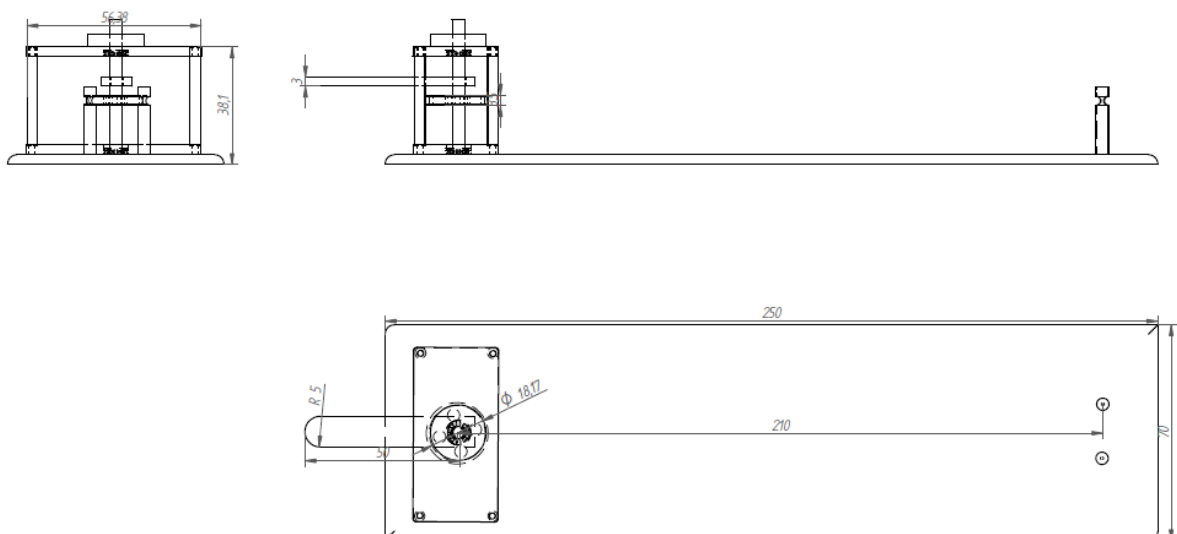


Figura 48. Plano detalle 2D. Alzado, planta y perfil de la estructura.



La fabricación a partir del diseño será manual y se necesita un material que cumpla las siguientes características:

- Fácil mecanizado en frío (corte, taladrado y avellanado)
- No conductor de la electricidad
- Alta resistencia, y bajo peso
- Bajo coste
- Buen aspecto exterior

El material elegido es Polimetilmetacrilato, comúnmente llamado metacrilato. Este material ofrece numerosas ventajas para ser utilizado en la fabricación del soporte:

- Transparencia de alrededor del 93%. Es el polímero más transparente.
- Alta resistencia al impacto (10 a 20 veces la del vidrio).
- Resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta. No hay un envejecimiento apreciable en 10 años de exposición exterior.
- Excelente aislante térmico y acústico.
- Ligero en comparación con el vidrio (aproximadamente la mitad), con una densidad de unos 1190 kg/m<sup>3</sup> similar al agua.
- Dureza similar a la del aluminio: se raya fácilmente con cualquier objeto metálico.
- Fácil combustión, no se apaga al ser retirado del fuego. Sus gases tienen olor afrutado y crepita al arder. No produce ningún gas tóxico al arder por lo que lo se puede considerar un producto muy seguro para elementos próximos a las personas al igual que la madera.
- Gran facilidad de mecanización y moldeo.
- Se comercializa en planchas rectangulares de entre 2 y 120 mm de espesor.
- Se puede mecanizar en frío pero no doblar (serrado, esmerilado, acuchillado, pulido, etc.). Se puede aplicar calor local para doblarlo.

Se eligen planchas de metacrilato transparente de 3 mm de espesor y se fabrica la estructura del prototipo. Se muestra a continuación el soporte completo con el cable de nitinol y el muelle (figura 49) y en detalle la polea y el eje (figura 50).

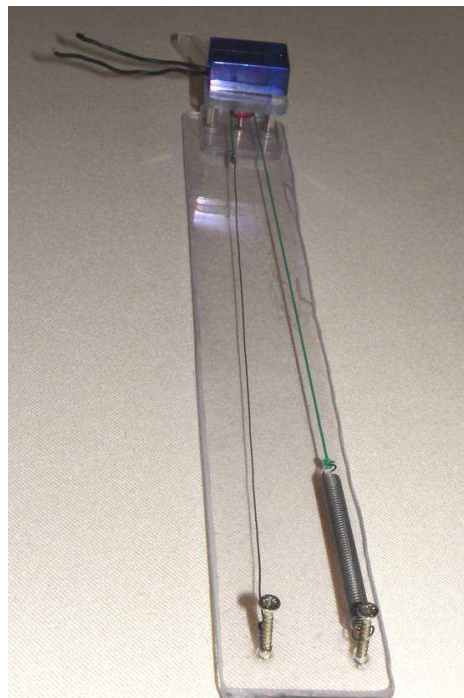


Figura 49. Sistema completo con muelle, correa y cable de nitinol.

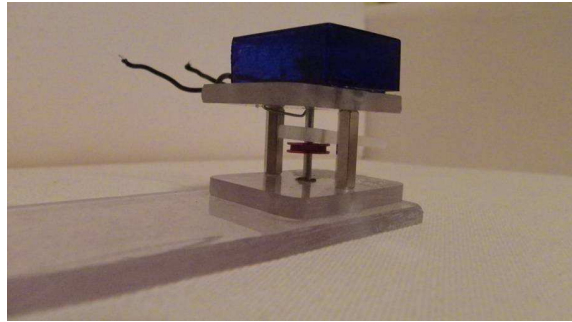


Figura 50. Detalle estructura. Eje, polea y rodamientos embutidos en metacrilato.

### 3.3 Diseño e implementación del sistema electrónico

La segunda parte fundamental del proyecto, es el sistema electrónico. Se encarga del control de posición y la regulación de la corriente aplicada al nitinol. El sistema se divide en tres subsistemas principales:

- Un microcontrolador (PIC) para obtener datos de posición, establecer comunicación con PC y enviar señales de control al circuito de regulación de corriente.
- Un circuito de regulación de corriente que recibe las señales de control del PIC para administrar la corriente eléctrica al cable de nitinol.
- Un sensor de giro acoplado en el eje. La señal analógica de la posición se recibe a través del puerto A/D del PIC, y es la variable de entrada a corregir por el sistema de control.

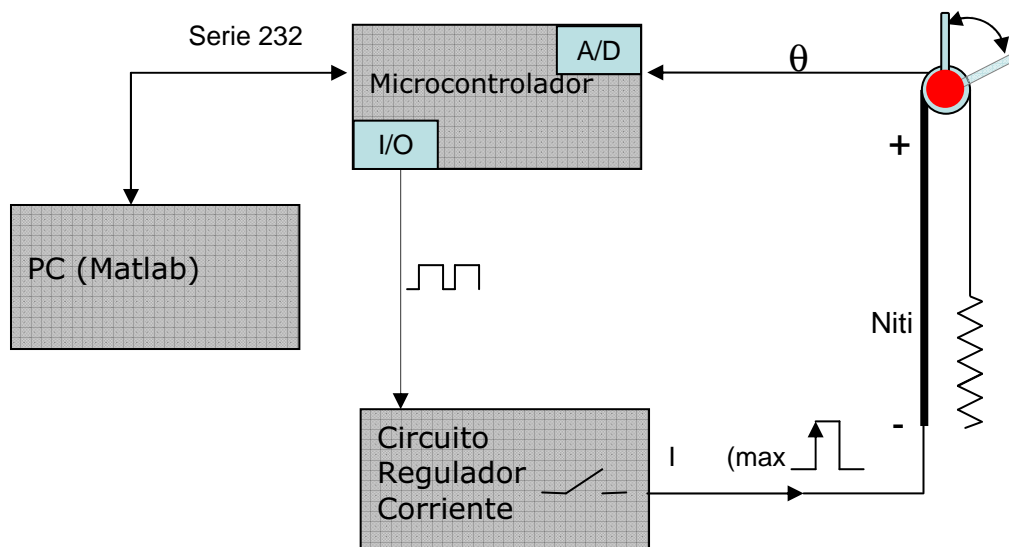


Figura 51. Esquema detallado sistema electrónico.

#### 3.3.1 Objetivos y especificaciones del sistema electrónico

El objetivo principal es preparar el sistema para hacer un control PID mediante señal PWM. En la siguiente figura se muestra el esquema del control en lazo cerrado que se realizará desde el PC.

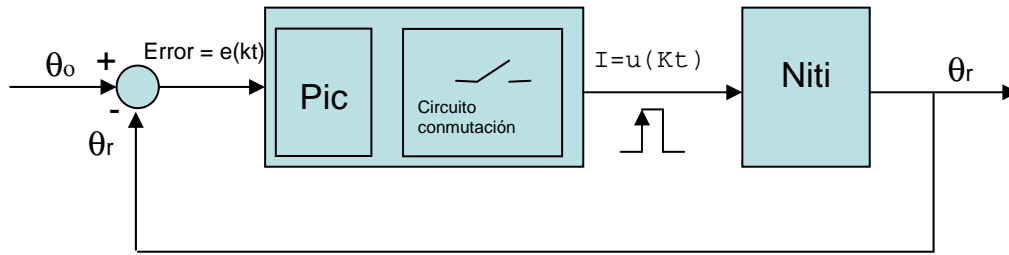


Figura 52. Esquema control posición.

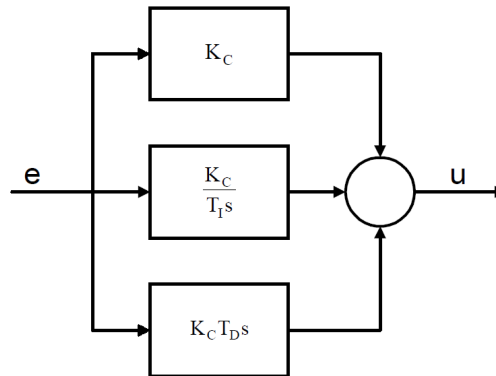


Figura 53. Esquema control PID en paralelo.

Se establece un tiempo mínimo para cerrar el ciclo de control, a partir de la velocidad del nitinol en su transformación austenítica. En este caso el fabricante asegura para un calentamiento a 100°C del cable un tiempo teórico de 1 milisegundo si se le aplica el correspondiente pico de corriente. Por lo tanto el tiempo de ciclo se establece en 1 ms. Este tiempo de ciclo es un dato fundamental, a partir del cual hay que garantizar una velocidad suficiente durante las comunicaciones, los cálculos que realiza el microprocesador y la frecuencia de conmutación del circuito de regulación.

$$t_{\text{envio-recepcion}} + t_{\text{calculo-PIC}} + t_{\text{conmutación}} < 1ms \quad \text{Ecuación 7. Tiempo de ciclo.}$$

Se supone una velocidad de envío estándar de 56 Kbps, si se envía un dato de 16 bits, el tiempo necesario para un envío y recepción del nuevo dato será de:

$$t_{\text{envio-recepcion}} = \frac{2 \cdot 16 \text{ bits}}{56 \text{ Kbps}} = 0.57 \text{ ms}$$

Se considera suficiente el tiempo empleado en las comunicaciones. Se puede configurar el protocolo a una velocidad superior de 112500 Kbps para asegurar una velocidad suficiente.

El tiempo de cálculo debe de ser mínimo y con una velocidad de microprocesador de 10 Mhz o más es suficiente. Se establece un tiempo de 0.1 μs por operación. Si en cada ciclo de control se realizan aproximadamente 1000 operaciones, se necesita un tiempo de cálculo por ciclo de:

$$t_{\text{calculo}} = 0.1 \text{ ms}$$

El tiempo de conmutación se calcula en el capítulo 3.3.3.2.2 de manera experimental:

$$t_{\text{conmutación}} = 58 \mu s$$



Por lo tanto la suma de todos los tiempos queda:

$$t_{\text{envio-recepcion}} + t_{\text{calculo-PIC}} + t_{\text{conmutación}} = 0.57ms + 0.1ms + 58\mu s < 1ms$$

Además es necesario establecer las especificaciones y funcionalidades de cada uno de los subsistemas.

El microcontrolador debe tener cumplir los siguientes requisitos:

- Puertos digitales de entrada y salida.
- Puerto A/D de al menos 8 bits de precisión.
- Librería para programar interrupciones para poder crear señales PWM.
- Protocolo CAN bus para una futura ampliación del sistema e integración con todos los grados de libertad de la mano.
- Protocolo comunicaciones serie.

Respecto al circuito de regulación de la corriente, las especificaciones son:

- El uso de transistores para controlar la activación del cable de nitinol, debe garantizar una frecuencia de conmutación de todo el circuito inferior al tiempo de ciclo establecido de 1 ms.
- Se establece una corriente máxima para el cable de mayor diámetro de 4 amperios. Se establece un valor sobredimensionado de 5 amperios de corriente máxima que debe ser soportada por los transistores.
- Activación de dos o más cables de nitinol, así se prepara el prototipo para futuras pruebas.

El sensor de giro debe cumplir los siguientes requisitos:

- Tamaño y peso reducido
- Diseño apto para acoplar en eje
- Reducido rozamiento
- Sensibilidad alta del grado girado que permita obtener un error de posición máximo de 1 %.

### 3.3.2 Microcontrolador

Se elige un microprocesador de la marca Microchip, modelo PIC de 32 bits. Es un microcontrolador muy avanzado que cumple con las especificaciones marcadas. Las principales características son:

- Alta velocidad de procesador, hasta 80 Mhz y bus interno de 32 bits.
- Integración protocolos de comunicación CAN, Ethernet, USB y serie.
- Puerto A/D de 10 bits.
- 10 puertos de 8 bits de entradas y salidas digitales.
- 8 timers para realizar interrupciones.
- ALU de 32 bits.

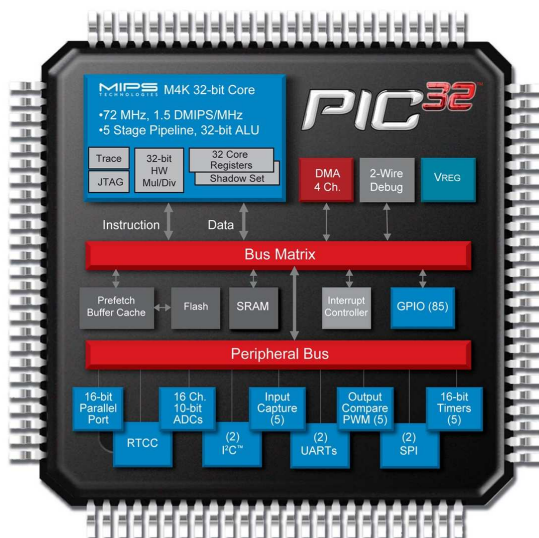


Figura 54. Esquema características PIC 32.



Figura 55. Placa con controlador PIC 32 (izquierda). Placa de expansión DM320002 (derecha).

La placa con el controlador PIC incluye los conectores TCP/IP, mini-USB, alimentación y Leds para pruebas. Esta placa se inserta en la placa de expansión de la figura. Esta placa facilita la conexión con cada patilla del microchip, y se le puede acoplar más tarjetas adicionales para otras pruebas. La programación se realiza en código C a través del programa de desarrollo MPLab IDE, instalado en el PC. Mediante el puerto USB del PC se carga el programa (transformado en código máquina) al PIC. Las conexiones son las siguientes:

- Comunicación serie con Matlab (requiere de adaptador de protocolo serie RS232 a USB).
- Entradas analógicas del sensor de giro.
- Salidas digitales para el control de la activación de los cables de nitinol.

Se muestra un esquema en detalle de las conexiones del PIC con el PC y con la placa electrónica.

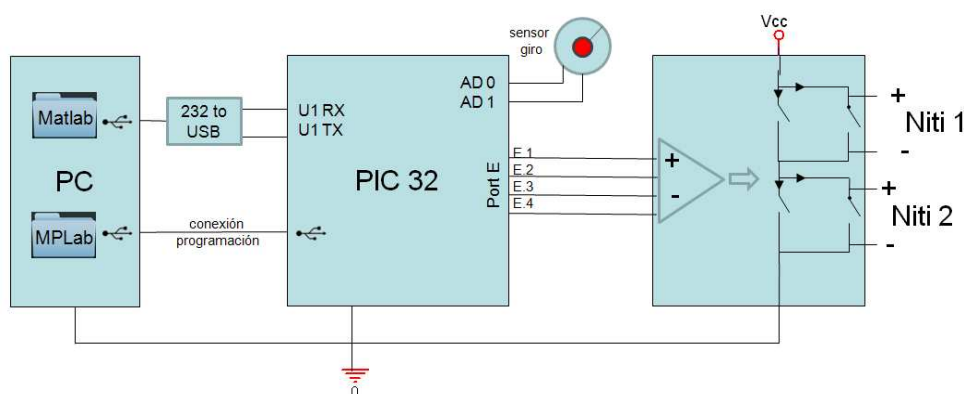


Figura 56. Esquema detallado conexiones PIC y el sistema electrónico.





### 3.3.3 Estudio teórico y experimental del circuito de conmutación electrónico

Se necesita un circuito que controle la activación de dos cables de nitinol, y que suministre 5 A a cada uno de ellos. La principal limitación existente es la elevada corriente que se maneja en paralelo, por lo que se busca una solución para poder manejar un máximo de 5 A en serie que llegue a todos los cables de nitinol. Se muestra un esquema del concepto del circuito de conmutación. Siempre existe un circuito cerrado para que la corriente circule por el circuito configurado en serie, para activar un cable, dos o ninguno.

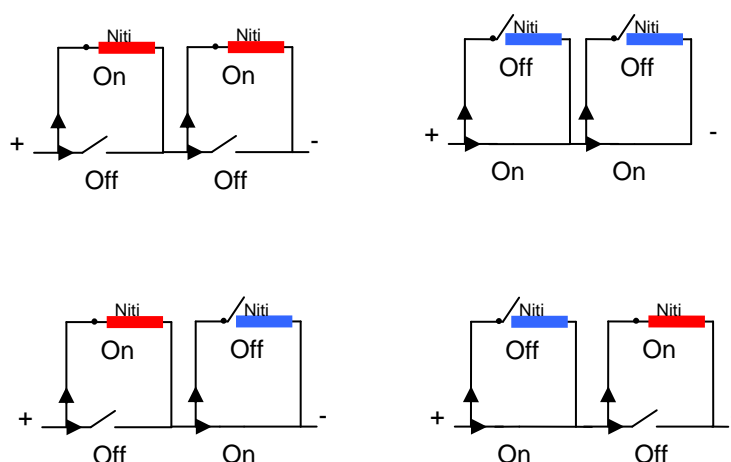


Figura 57. Esquema de los modos de conducción de la corriente.

#### 3.3.3.1 Diseño y Simulación del circuito en Orcad

Se realiza el diseño del circuito de conmutación en Orcad, para comprobar que cumple con las especificaciones. Se muestra el esquema del circuito en la siguiente figura.

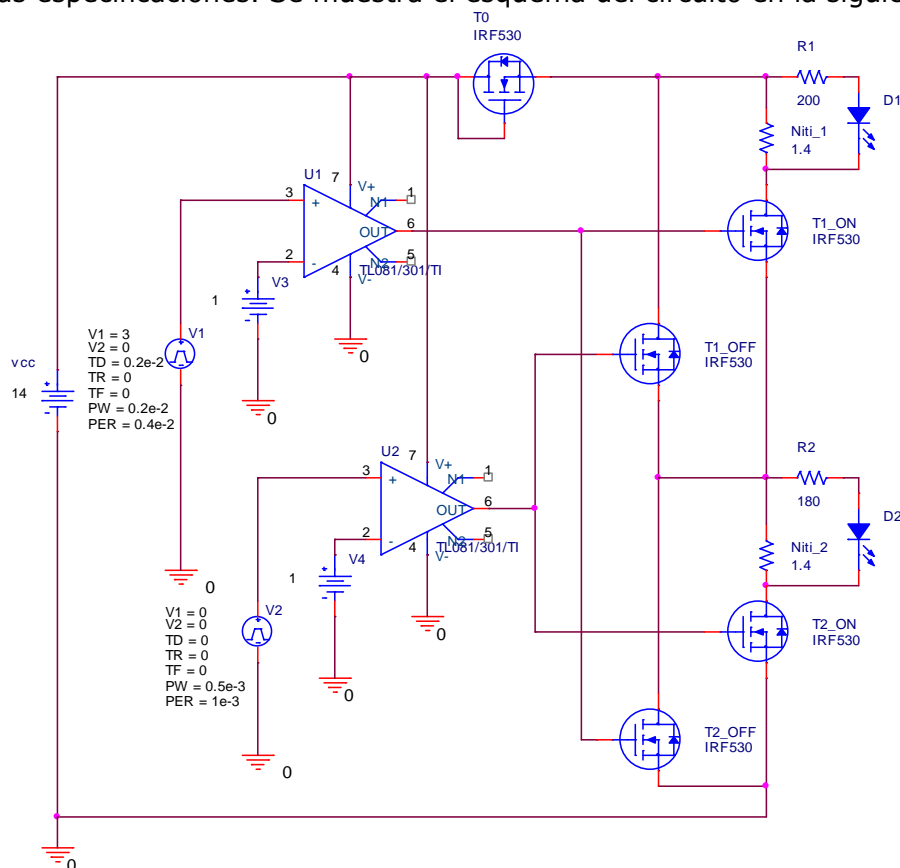


Figura 58. Esquema completo circuito conmutación.





## Funcionamiento general

La alimentación  $V_{cc}$  se establece en 14V, suficiente para activar los transistores y obtener aproximadamente 5 A en los cables de nitinol. Regulando la tensión de la fuente, se regula la corriente que se administra a los cables de nitinol. Se han elegido transistores modelo IRF 530. La señal de entrada digital del PIC es simulada por las ondas V1 y V2. El operacional TI081 amplifica la señal de 3.3 V a  $V_{cc}$  para activar los correspondientes transistores y el cable de nitinol deseado. R1 y R2 corresponden con los cables de nitinol de 0.51mm de diámetro y 280mm de longitud, como se calculó en el capítulo 3.2. El transistor T0 siempre permanece activado y su función es soportar una alta caída de tensión  $V_{gs0}$  para que las tensiones  $V_{gs}$  de los demás transistores sean similares. Así se consigue que la corriente por el nitinol 1 y 2 sean iguales.

## Transistor IRF 530

Se utilizan transistores mosfet de canal N, modelo IRF 530. Se trata de transistores diseñados para sistemas de conmutación y regulación en drivers de motores, convertidores, etc. Su capacidad de respuesta es alta y ofrece soporte corrientes y potencias suficientes para el uso en el circuito diseñado.

Las características principales son las siguientes:

- Id max= 14A.
- Vds max= 100V.
- $r_{DS(ON)} = 0.16\Omega$ .
- Potencia máxima = 79W.
- Velocidad de activación del orden de nanosegundos

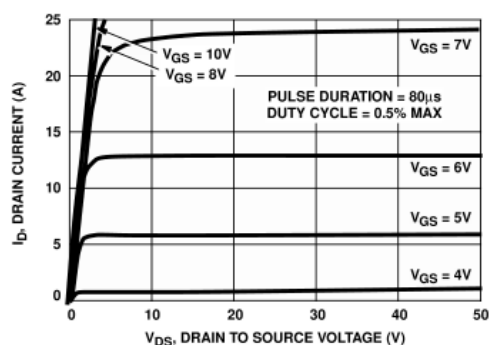


Figura 59. Curvas características Id-Vds IRF530.

Un parámetro fundamental es la tensión umbral ( $V_{gs_{th}} = 3 \text{ V}$  según hoja de características) que es necesario superar para la activación del transistor. Según el diseño del circuito, la activación de un cable, dos o ninguno siempre requiere la activación de dos transistores en serie. Se analiza la tensión necesaria para que la tensión  $V_{gs}$  en ambos transistores sea suficiente para activarlos.

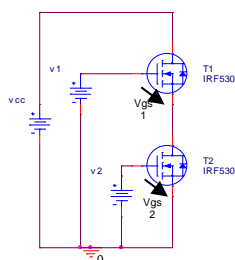


Figura 60. Esquema de dos Mosfet en serie.

Para la activación del T1 se debe cumplir:



$$V_{cc} > V_{gs_1}$$

$$V_{gs_1} > V_{gs_{th}} + V_{gs_2} \quad \text{Ecuación 8. Tensión Vgs para activar mosfet en serie.}$$

$$V_{gs_2} > V_{gs_{th}} = 3V$$

Sustituyendo queda:

$$V_{cc} > 3 + 3 = 6V$$

La tensión de alimentación del circuito debe ser mayor de 6V para garantizar la activación simultánea de dos transistores en serie.

### 3.3.3.1.1 Simulaciones

Se realizan distintas simulaciones en Orcad para comprobar su funcionamiento y con varios objetivos principales:

- El consumo de potencia de los transistores no supere el máximo teórico. Además se calcula si es necesario los disipadores de potencia necesarios para favorecer la refrigeración del circuito.
- La corriente que se administra a cada cable es la deseada para cualquier configuración (un cable, dos o ninguno).
- Simulación en frecuencia para conocer la frecuencia máxima de funcionamiento y correcta conmutación del circuito.

#### 3.3.3.1.1.1 Funcionamiento conmutación

Se simula el circuito en 4 distintas configuraciones para la activación correspondiente de un cable de nitinol, dos o ninguno.

Se muestran a continuación la corriente que circula por los cables de nitinol según sea la configuración, además de las tensiones en los transistores.

#### Configuración 1 (activación nitinol 1)

En las siguientes gráficas se muestran las simulaciones correspondientes al funcionamiento del circuito en la configuración 1. El cable nitinol 1 se activa según la señal de entrada V1 con una frecuencia de 10Khz. Se comprueba que el funcionamiento del circuito es correcto para esa frecuencia, según los requerimientos (figura 61]. El circuito conmuta correctamente en 100us, un tiempo muy inferior al tiempo de ciclo establecido en 1ms. Además se consigue administrar un corriente de 5 A al cable de nitinol.

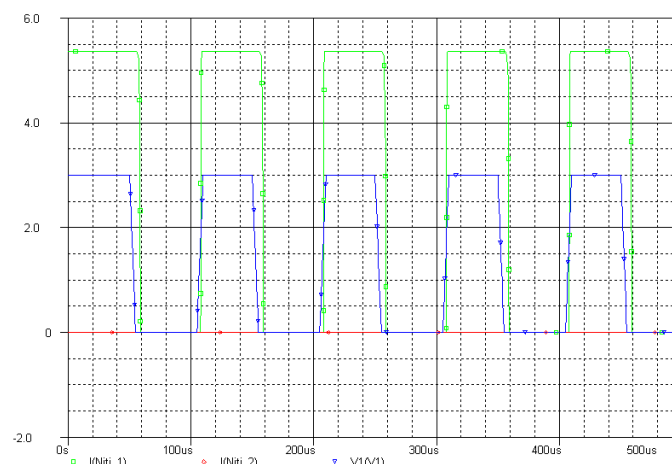


Figura 61. Corriente Niti 1 y 2 y señal V1. Configuración 1 (Niti 1 ON).



En la gráfica siguiente (figura 62) se muestran las tensiones  $V_{gs}$  de los transistores que controlan la activación de los cables de nitinol. Para activar el cable 1, es necesario activar los transistores T1\_ON y T2\_OFF, con una tensión superior a  $V_{gs_{th}}=3V$ .

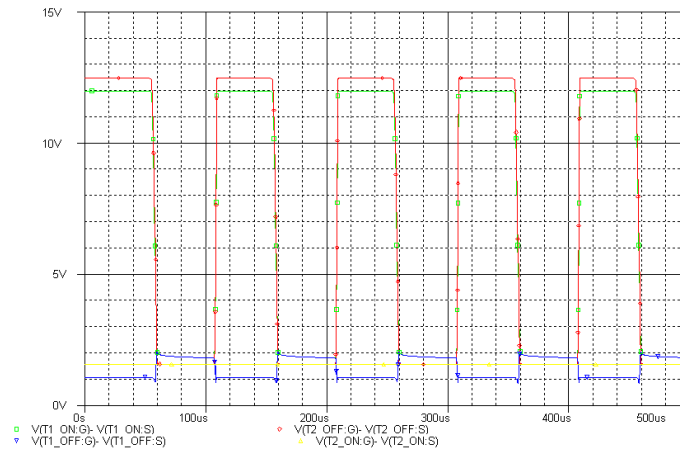


Figura 62.  $V_{gs}$  de todos los transistores. Configuración 1 (Niti 1 ON).

### Configuración 2 (activación nitinol 2)

En las gráficas siguientes se muestran las simulaciones correspondientes al funcionamiento del circuito en la configuración 2. El cable nitinol 1 se activa según la señal de entrada V2 con una frecuencia de 10Khz. Se comprueba que el funcionamiento del circuito es correcto para esa frecuencia, según los requerimientos (figura 63). El circuito conmuta correctamente en 100us, un tiempo muy inferior al tiempo de ciclo establecido en 1ms. Además se consigue administrar un corriente de 5 A al cable de nitinol.

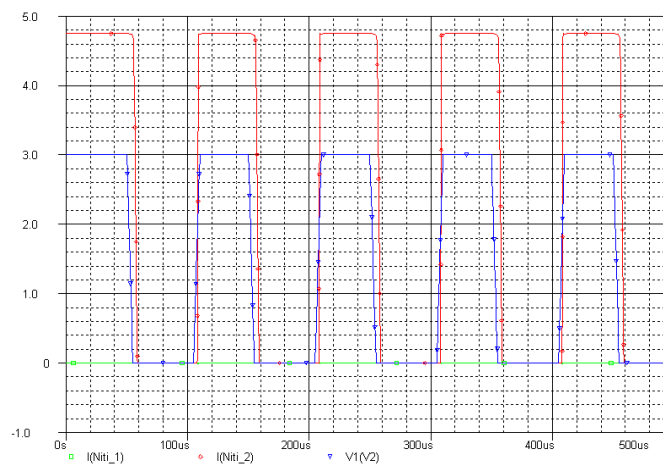


Figura 63. Corriente Niti 1 y 2 y señal V2. Configuración 2 (Niti 2 ON).

En la siguiente gráfica (figura 64) se muestran las tensiones  $V_{gs}$  de los transistores que controlan la activación de los cables de nitinol. Para activar el cable 2, es necesario activar los transistores T1\_OFF y T2\_ON, con una tensión superior a  $V_{gs_{th}}=3V$ .

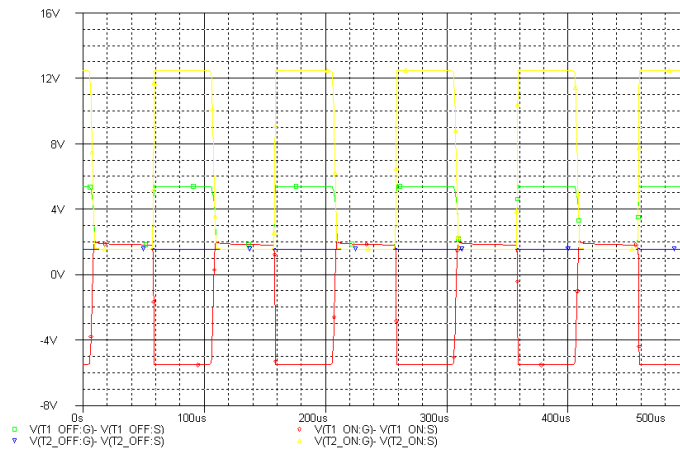


Figura 64. Vgs de todos los transistores. Configuración 2 (Niti 2 ON).

### Configuración 3 (activación nitinol 1 y 2)

En las gráficas siguientes se muestran las simulaciones correspondientes al funcionamiento del circuito en la configuración 3. El cable de nitinol 1 y 2 se activan simultáneamente según la señal de entrada V2 con una frecuencia de 10Khz. Se comprueba que el funcionamiento del circuito es correcto para esa frecuencia, según los requerimientos (figura 65). El circuito conmuta correctamente en 100us, un tiempo muy inferior al tiempo de ciclo establecido en 1ms. Además se consigue administrar un corriente de 5 A al cable de nitinol.

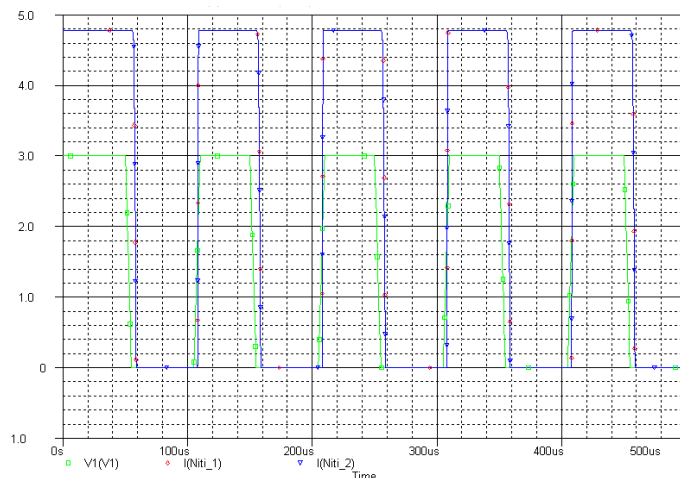


Figura 65. Corriente Niti 1 y 2 y señal V1. Configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).

En la siguiente gráfica (figura 66) se muestran las tensiones Vgs de los transistores que controlan la activación de los cables de nitinol. Para activar el cable 1y 2, es necesario activar los transistores T1\_ON y T2\_ON, con una tensión superior a  $V_{gs_{th}}=3V$ .

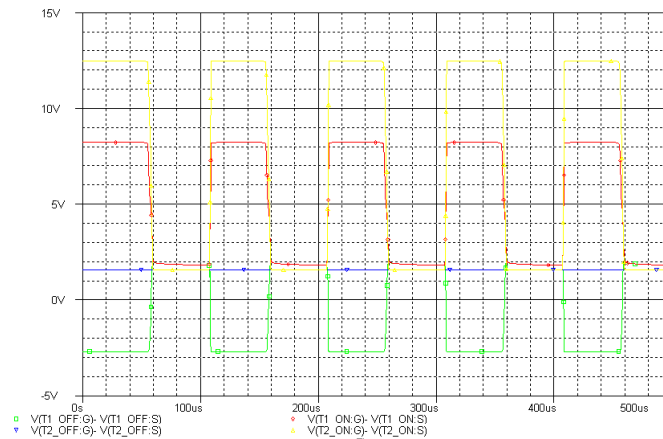


Figura 66. Vgs de todos los transistores. Configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).

### Configuración 4 (activación de ningún nitinol)

En las siguientes gráficas se muestran las simulaciones correspondientes al funcionamiento del circuito en la configuración 4. No se activan ninguno de los dos cables de nitinol. Se comprueba que para una señal de entrada de 0 V, la corriente por los cables es prácticamente nula. Se muestran las tensiones Vgs de los transistores que controlan la activación de los cables de nitinol (figura 67). Para mantener desactivados los cables 1 y 2, es necesario activar los transistores T1\_OFF y T2\_OFF, con una tensión superior a  $V_{gs_{th}}=3V$ .

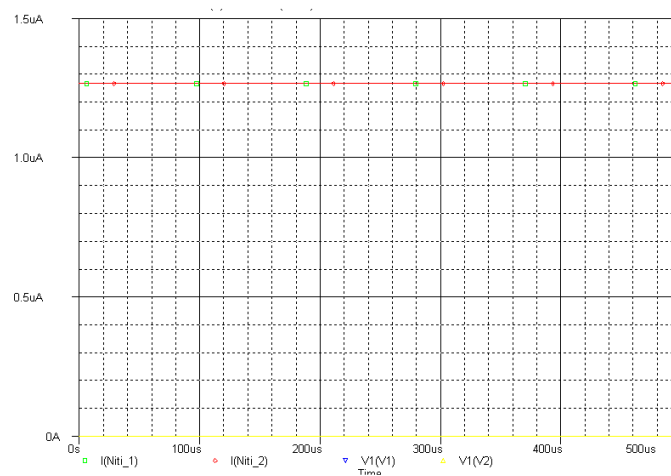


Figura 67. Corriente Niti 1 y 2. Señal V1 y V2. Configuración 4 (Niti 1 OFF, Niti 2 OFF).

En la siguiente gráfica (figura 68) se muestran las tensiones Vgs de los transistores que controlan la activación de los cables de nitinol. Para desactivar el cable 1 y 2, es necesario activar los transistores T1\_OFF y T2\_OFF, con una tensión superior a  $V_{gs_{th}}=3V$ .

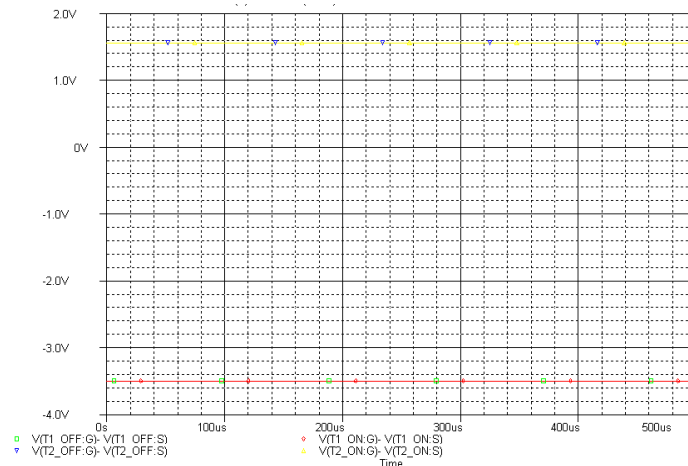


Figura 68. Vgs de todos los transistores. Configuración 4 (Niti 1 OFF, Niti 2 OFF).

### 3.3.3.1.1.2 Consumo de potencia IRF 530

Se muestran las gráficas correspondientes al consumo de potencia de los transistores mosfet, para cada una de las configuraciones (figura 69 a 72). Los consumos para la configuración 4 con los dos cables de nitinol desactivados son nulos, porque no existe ninguna resistencia en el paso de la corriente.

#### Configuración 1 (activación nitinol 1)

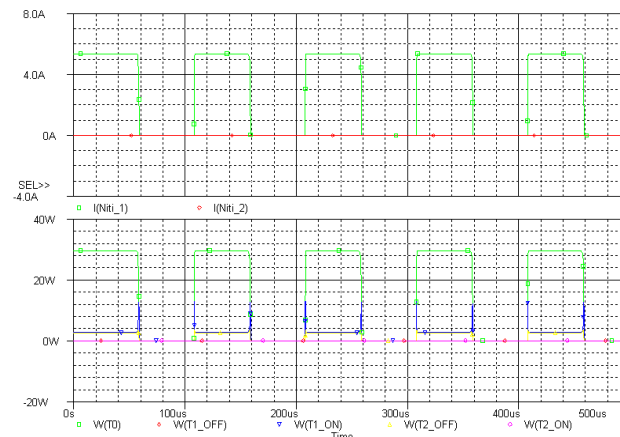


Figura 69. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).

#### Configuración 2 (activación nitinol 2)

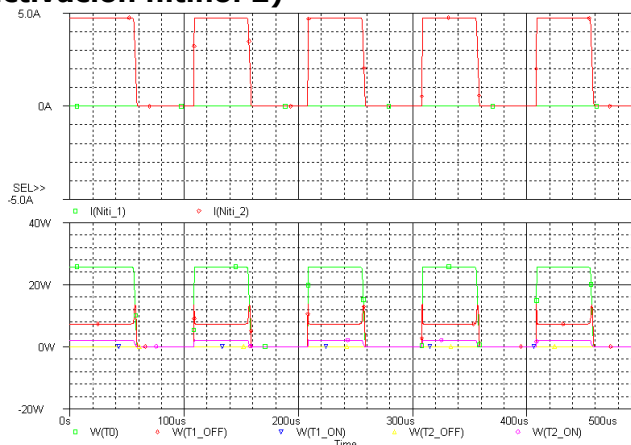


Figura 70. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).



### Configuración 3 (activación nitinol 1 y 2)

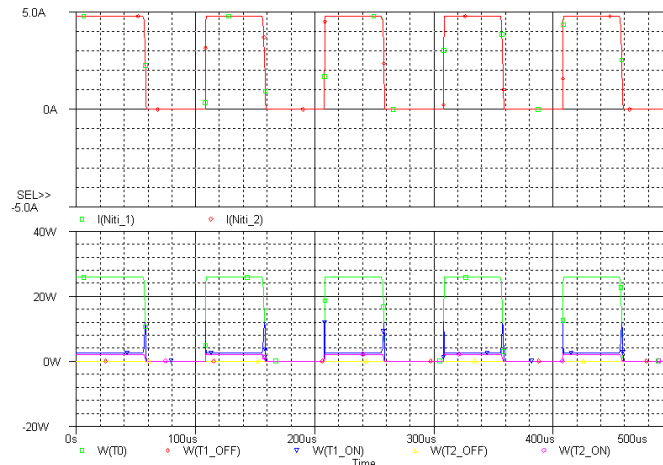


Figura 71. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).

### Configuración 4 (activación de ningún nitinol)

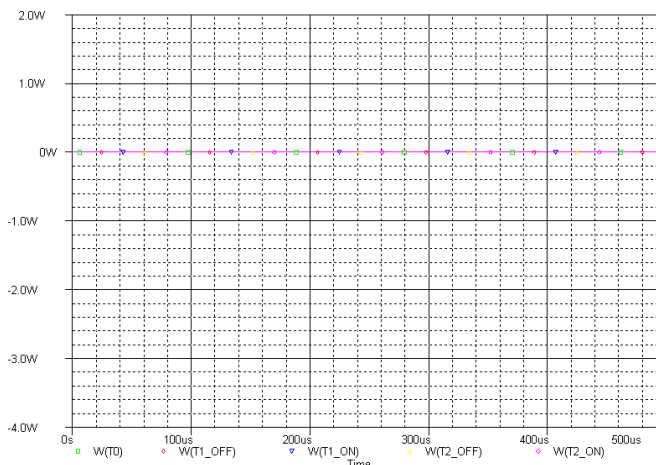


Figura 72. Corriente Niti 1 y 2 (arriba). Consumo de potencia Mosfet (abajo).

#### 3.3.3.1.2 Cálculo de disipadores de potencia

El consumo de potencia máximo de los transistores mosfet es de 30W y no supera los 79W máximos que indica el fabricante. La relación entre el valor de la resistencia interna y la temperatura se muestra en la figura siguiente. Estos datos corresponden al funcionamiento del transistor debido a la activación por pulsos de corriente de duración del orden de microsegundos. La utilización del prototipo, implica mantener el cable de nitinol activo durante un tiempo elevado de varios segundos. Para realizar cualquier tarea se necesita desarrollar una fuerza constante durante ese tiempo. Por eso se necesita añadir disipadores de potencia para asegurar que la temperatura de los mosfet no aumenta al mantener los mosfet activos durante tiempo prolongado. La potencia que disipa el mosfet es de 79W a una temperatura de cápsula de  $T_c=25^{\circ}\text{C}$ , pero no es constante con  $T_c$  como muestra en la gráfica inferior (figura 73). Otro motivo para añadir disipadores es la elevada temperatura de la cápsula del mosfet. En el circuito real la temperatura de la cápsula es mayor a  $25^{\circ}\text{C}$  y la potencia disipada disminuye según la siguiente figura que facilita el fabricante.

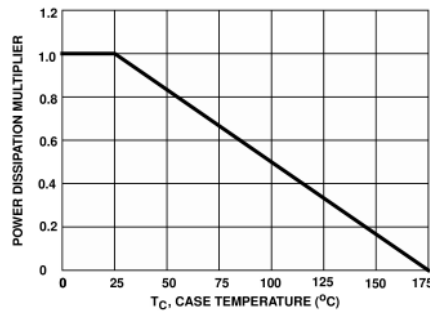


Figura 73. Relación factor de disipación potencia - temperatura.

Se calcula la temperatura  $T_c$  y el disipador necesario para evacuar 30W. Se comprueba después si a la temperatura  $T_c$  el mosfet puede disipar 30W. Las condiciones a cumplir son:

$$T_j < 175^\circ C \quad \text{Ecuación 9. Temperatura máxima del semiconductor.}$$

$$P_{\max}(T_c) > 30W \quad \text{Ecuación 10. Potencia que disipa el mosfet a } T_c$$

En el esquema siguiente (figura 74) se muestra el esquema del mosfet con disipador:

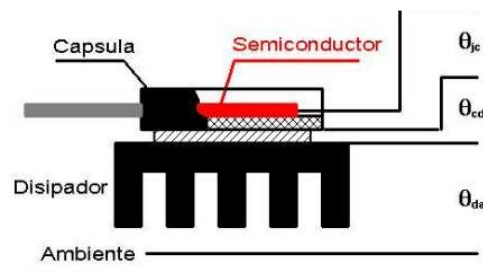


Figura 74. Esquema montaje de un disipador en cápsula TO-220 del Mosfet.

Se muestra el circuito térmico equivalente del mosfet con disipador:



Figura 75. Circuito térmico equivalente.

$$P_D = \frac{T_j - T_a}{\theta_{jc} + \theta_{cd} + \theta_{da}} \quad \text{Ecuación 11. Potencia total disipada.}$$

Dónde:

$\theta_{jc}$  es la resistencia térmica de entre el semiconductor y la cápsula ( $1.9^\circ C/W$  a  $25^\circ C$  según fabricante).

$\theta_{cd}$  es la resistencia térmica de la cápsula ( $0.8^\circ C/W$  para modelo T0220 con montaje directo).

$\theta_{da}$  es la resistencia térmica del disipador.

$T_j$  es la temperatura del semiconductor (valor máximo de  $175^\circ C$ ).

$T_c$  es la temperatura de la cápsula del semiconductor.

$T_d$  es la temperatura del disipador.

$T_a$  es la temperatura ambiente ( $25^\circ C$ ).



Se calcula entonces el valor de la resistencia térmica del disipador para un consumo de potencia de 30W.

$$\theta_{da} = \frac{(T_j - T_a)}{P_D} - (\theta_{jc} + \theta_{cd}) = \frac{175 - 25}{30} - (1.9 + 0.8) = 2.3^\circ C/W$$

Se utiliza un disipador con una resistencia térmica lo más parecido a  $\theta_{da}$ . Se elige el disipador mostrado a continuación (figura 76) con  $\theta_{da} = 2^\circ C/W$ .



Figura 76. Disipador aleteado HSAP29-1.

Se calcula la potencia máxima disipada con el disipador elegido:

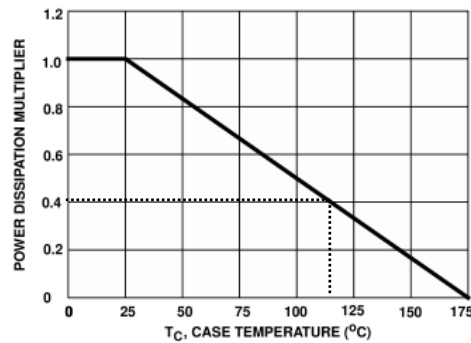
$$P_D = \frac{175 - 25}{1.9 + 0.8 + 2} = 31.92W$$

Se calcula el valor de la temperatura en la cápsula ( $T_c$ ):

$$P_D = \frac{T_j - T_c}{\theta_{jc}}$$

$$T_c = T_j - P_D \cdot \theta_{jc} = 175 - 31.9 \cdot 1.9 = 114^\circ C$$

Con el valor de  $T_c$  obtenido, se comprueba en la siguiente gráfica del fabricante si el mosfet es capaz de disipar 30W.



La pendiente de la gráfica es:

$$m = \frac{-1.79W}{(175 - 25)^\circ C} = -0.52 W/^\circ C$$

Se calcula de manera exacta el factor de disipación de potencia, que se puede obtener de manera intuitiva en la gráfica anterior:

$$\text{Factor de disipación} = \frac{79W - ((114 - 25^\circ C) \cdot 0.52 \frac{W}{^\circ C})}{79} = \frac{79 - 46.28}{79} = 0.415$$

Para una temperatura  $T_c$  de  $114^\circ C$ , se comprueba que la máxima potencia que puede disipar el encapsulado es mayor que la potencia necesaria:

$$P_D = 79W \cdot 0.415 = 32.72W > 31.9W$$



### 3.3.3.1.3 Frecuencia de funcionamiento

Se realiza un análisis en frecuencia del funcionamiento del circuito para cada una de las configuraciones (figuras 77 a 79). No se incluye la configuración 4 que desactiva los dos cables de nitinol porque no es relevante. Se calcula la frecuencia máxima de funcionamiento del circuito (tabla 10).

	$f_{\max}$ (MHz)
Cable 1 on	3.88
Cable 2 on	4.67
Cable 1-2 on	3.51

Tabla 10. Frecuencias máximas de funcionamiento.

Se establece una frecuencia máxima teórica de funcionamiento de 3.5 MHz. Este valor se calcula de forma experimental y es probable que la frecuencia sea inferior debido principalmente a la frecuencia máxima de funcionamiento de la fuente de alimentación del laboratorio.

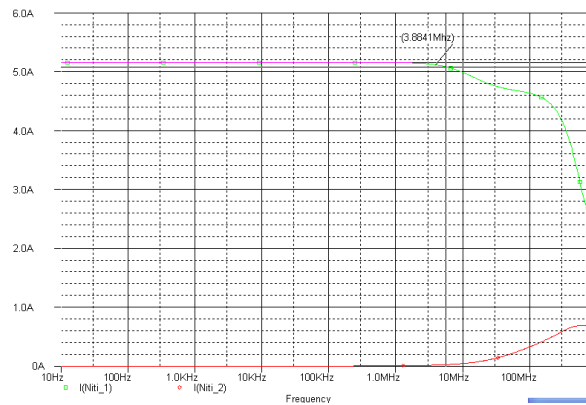


Figura 77. Análisis en frecuencia de la configuración 1 (Niti 1 ON).

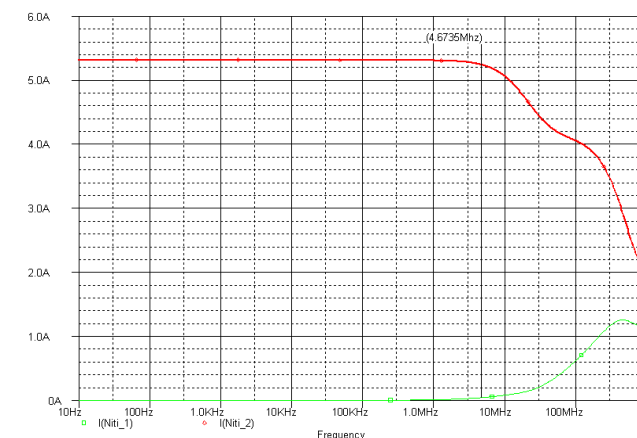


Figura 78. Análisis en frecuencia de la configuración 2 (Niti 2 ON).

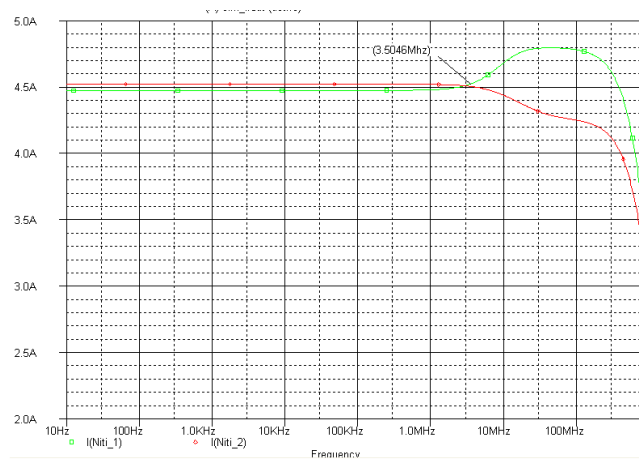


Figura 79. Análisis en frecuencia de la configuración 3 (Niti 1 ON, Niti 2 ON).

### 3.3.3.1.4 Circuito electrónico de pruebas

Una vez que se comprueba el funcionamiento y se obtienen datos correctos, se monta el circuito en una placa de pruebas, comprobando todos los puntos de soldadura. Es esquemático del circuito final fabricado se muestra a continuación (figura 80).

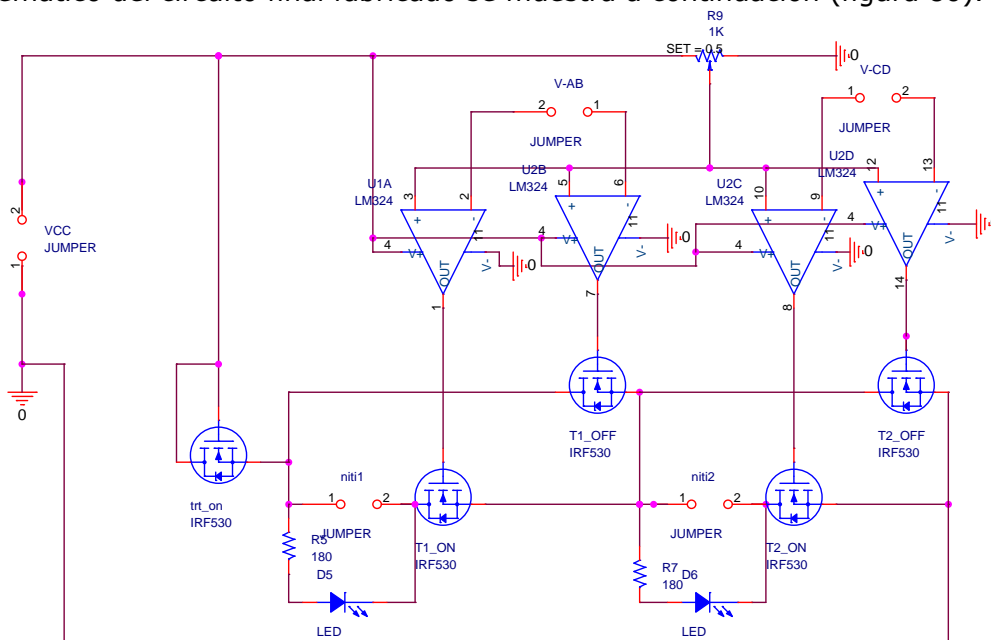


Figura 80. Esquema completo final del circuito de conmutación.

Se calcula el calibre de los cables necesarios para soportar la corriente nominal del circuito. Se elige cable unipolar para una corriente máxima, según la siguiente tabla del reglamento de baja tensión:

Sección Nominal [mm <sup>2</sup> ]	Intensidad de corriente admisible [Amperes]	
	En cañería	Sobre bandeja
0,35	1	1
0,50	3	3
0,75	8	10
1	10,5	12
1,50	13	15,5
2,50	18	21
4	24	28
6	31	36
10	42	50
16	56	68
25	73	89
35	89	111
50	108	134
70	136	171
95	164	207
120	188	239
150	310	385

Figura 81. Tabla intensidad máxima para cable unipolar. REBT.

El cable elegido para una intensidad nominal de 5 A, es del 0.75 mm<sup>2</sup> de sección. Los cables de nitinol se conectan en los terminales 1 (niti1) y 2 (niti2) mediante pinzas. Las entradas digitales Vab y Vcd corresponden a las señales digitales procedentes del puerto E del PIC. También se añade una resistencia R9 para ajustar la tensión V+ en el comparador LM324. El circuito real montado sobre una placa de pruebas se muestra a continuación (figura 82).

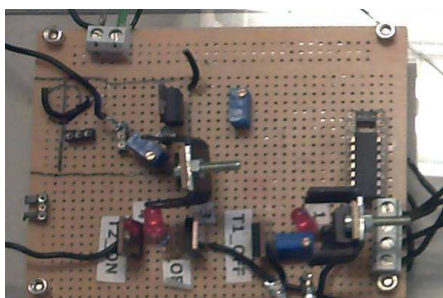


Figura 82. Circuito final montado sobre placa de pruebas.

### 3.3.3.2 Medidas experimentales

Una vez fabricada la placa, se realizan las conexiones con el PIC y programa el controlador para activar y desactivar los cables de nitinol 1 y 2. De esta manera se comprueba el funcionamiento de la placa fabricada y la correcta activación de los cables de nitinol con la corriente deseada. Se muestra a continuación el sistema completo formado por el PIC y la placa electrónica (figura 83).

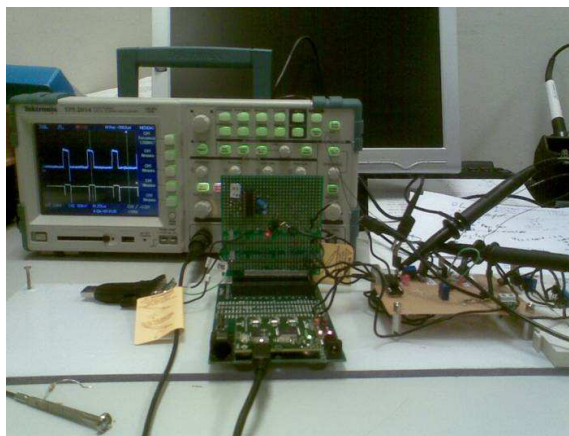


Figura 83. Circuito conmutación y PIC conectados.



Se utilizan dos cables de nitinol de distinto diámetro y longitud:

	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	R ( $\Omega$ /m)	R( $\Omega$ )
Niti 1	200	0.51	4.3	0.86
Niti 2	80	0.38	8.2	0.67

Tabla 11. Características cables de nitinol de prueba.

Se regula la fuente de alimentación para cumplir las especificaciones y condiciones de funcionamiento:

$$V_{cc} > 3 + 3 = 6V$$

$$I_{\max} = 5A$$

Se regula a una tensión de alimentación Vcc de 10 V y una corriente de 4.5A.

Se prueba el funcionamiento del circuito en las distintas configuraciones y se valida el sistema para probar posteriormente su funcionamiento a máxima frecuencia.

prueba	descripción	resultado
Configuración 1	(activación nitinol 1)	Ok
Configuración 2	(activación nitinol 2)	Ok
Configuración 3	(activación nitinol 1 y 2)	Ok
Configuración 4	(desactivación)	Ok

Tabla 12. Resultados de las pruebas de funcionamiento de la placa electrónica.

Con la ayuda de un osciloscopio electrónico, se comprueba la tensión que soporta cada cable de nitinol y si la corriente que circula por cada uno es la esperada (figura 84).

$$I_{\text{Nitinol}} \approx 4.5A$$

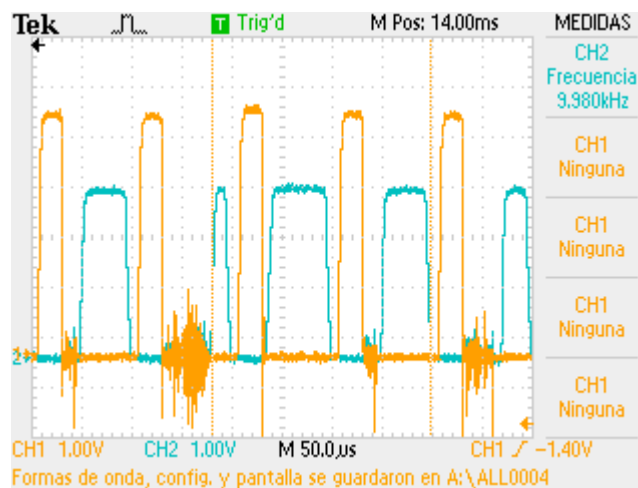


Figura 84. Simulación configuración 3 (activar niti 1 y 2).

	V	R( $\Omega$ )	I
Niti 1	3.6	0.86	4.2
Niti 2	2.9	0.67	4.3

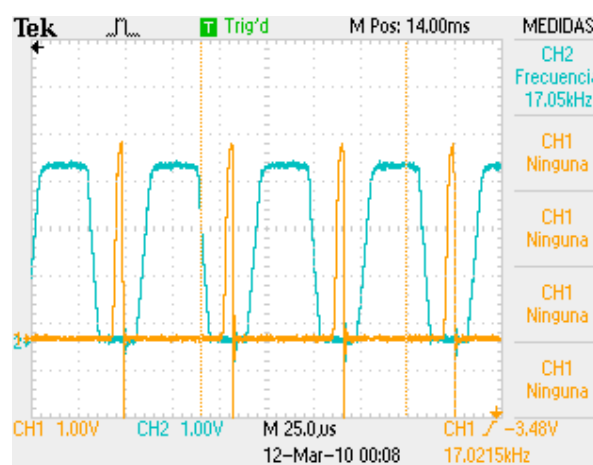
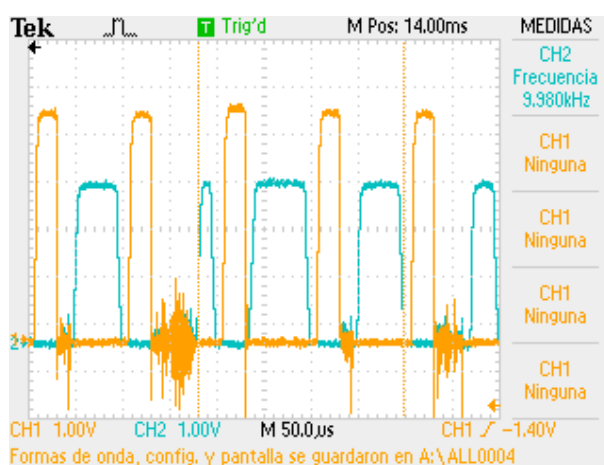
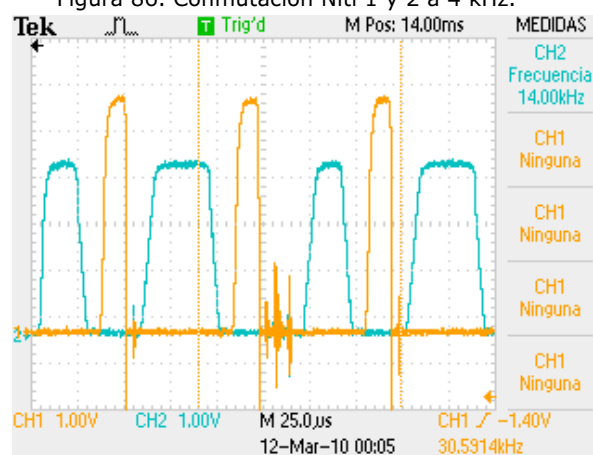
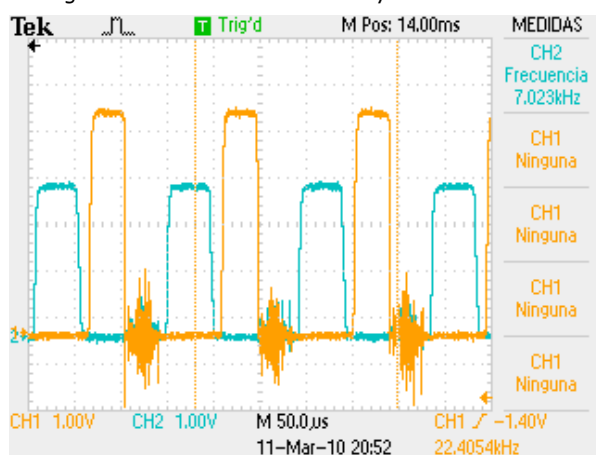
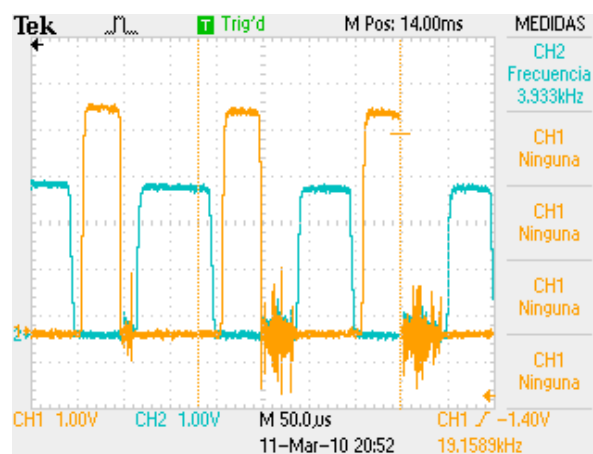
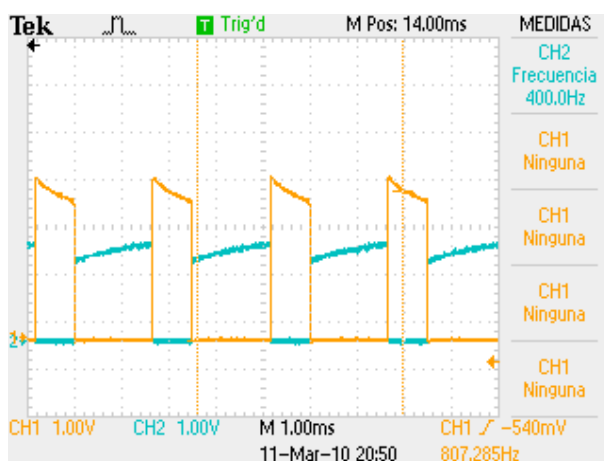
Tabla 13. Resumen valores reales tensión y corriente en cables de nitinol.

Se obtiene valores similares de corriente y cercanos a 4.5A durante la activación conmutada de los cables de nitinol 1 y 2 (tabla 13).



### 3.3.3.2.1 Frecuencia de conmutación

Se introduce una señal a distintas frecuencias para conmutar los cables de nitinol, y comprobar la frecuencia máxima real de funcionamiento. Desde el PIC se genera una señal PWM para activar y desactivar el cable de nitinol 1 y 2. Se muestran las gráficas obtenidas a distintas frecuencias (figuras 85 a 91).



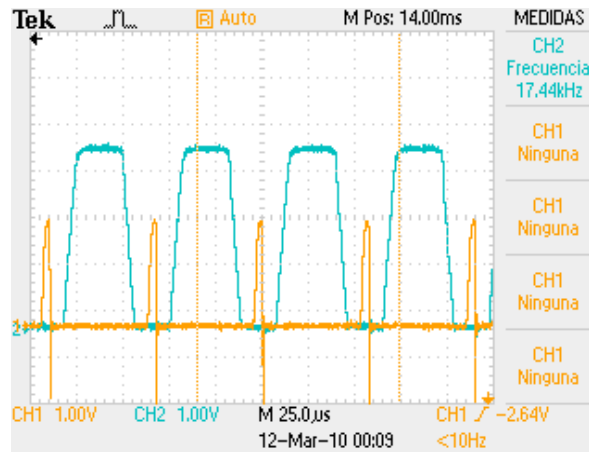


Figura 91. Conmutación Niti 1 y 2 a 17.5 kHz.

Experimentalmente se comprueba que el funcionamiento del circuito es óptimo hasta 17Khz. A partir de esta frecuencia de conmutación, la tensión por el nitinol 1 empieza a disminuir, porque el tiempo de respuesta es superior al periodo de conmutación. Se establece el límite en esta frecuencia y se obtiene el tiempo de conmutación:

$$t_{conmutación} = \frac{1}{17Khz} = 58\mu s$$

### 3.3.4 Sensor de giro

Se adquiere un sensor de giro tipo potenciómetro con las características necesarias para cumplir las especificaciones. El sensor es de la casa Crouzet, modelo 89120302 (figura 92).



Figura 92. Sensor de giro potenciométrico.

En la siguiente figura se muestran las medidas del sensor, que cumplen con el requisito de tamaño reducido necesario.

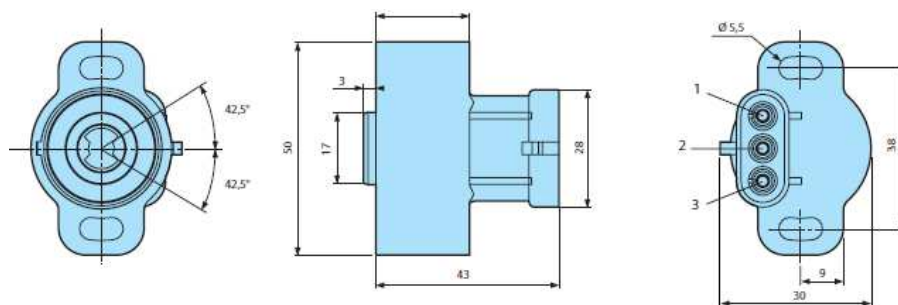


Figura 93. Medidas sensor giro potenciométrico.



Las características del sensor se muestran en la siguiente tabla (tabla 14).

Recorrido mecánico	180°
Recorrido eléctrico	130°
Resistencia	5kΩ ±20%
Corriente max.	5.4 mA
linealidad	2%

Tabla 14. Características sensor giro potenciométrico.

Se ajusta la salida del sensor con un potenciómetro (R) que regula el divisor de tensión, para obtener 3V máximos en la entrada del convertor A/D y además limitar la corriente máxima (figura 94).

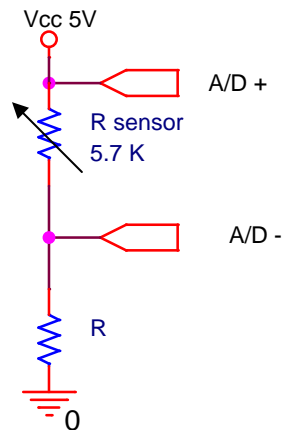


Figura 94. Esquema tensión de entrada en convertidor A/D.

$$\frac{5.7K}{R + 5.7K} \cdot 5V = 3V$$

$$R = 3.8K$$

*Cálculo max I :*

$$I_{max} = \frac{5V}{3.8K} = 1.31mA < 5.4mA$$

El rango de funcionamiento eléctrico de 130° se ajusta al valor de 120° que se ha especificado. La salida analógica del sensor funciona en ese rango de 130°, menor que el rango de movimiento mecánico de 180°. Según se muestra en la figura siguiente, la salida efectiva del sensor se encuentra en un rango inferior de 0.5 a 4.5V (figura 95). Es necesario tener en cuenta el offset inicial en el montaje del sensor en el mecanismo. Se acopla el sensor al eje y se ajusta la posición inicial (0°) teniendo en cuenta este desfase inicial.



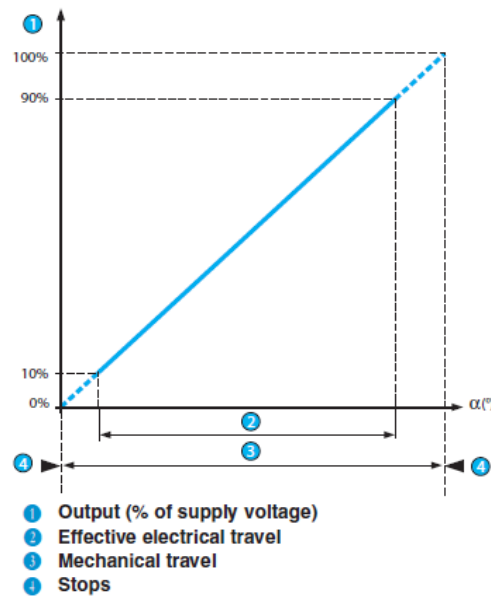


Figura 95. Porcentaje de la resistencia en función del ángulo girado.

El fabricante no facilita información precisa de la sensibilidad y resolución del sensor, por lo que se obtiene de manera aproximada y experimental. La resolución mínima aproximada es de  $3^\circ$  y la sensibilidad de  $40 \Omega/^\circ$ . Con este valor de resolución obtenido, no se puede asegurar un control de la posición menor al 1%. Como se trata de un prototipo se realizan las pruebas con este sensor, pero no se garantiza un control preciso de la posición del accionamiento.

Por último, se ha modificado el sensor para poder acoplarlo al eje. Para ello se desmonta la carcasa, se saca el disco resistivo y se conectan los dos terminales con las entradas del conversor A/D. Se muestra a continuación el sensor de giro acoplado al eje (figura 96).



Figura 96. Disco resistivo del sensor desmontado y acoplado al eje.

### 3.4 Implementación del software

Para la implementación del sistema de control se necesita una comunicación constante y bidireccional entre el PIC y Matlab. El objetivo es preparar el prototipo para el desarrollo de algoritmos complejos de control desde Simulink en el futuro. A través del sensor A/D del PIC se obtiene el valor de giro del dedo. Este dato se manda a Matlab a través del puerto serie para realizar el control de la posición deseada. Desde Matlab se devuelve la orden de activación o desactivación del cable de nitinol para regular el giro del accionamiento. De este modo se realiza un control proporcional de la posición del sistema. El PIC ejecuta las órdenes de conmutación a través de los puertos de salida digitales del microcontrolador (puerto E), que se conectan con la placa electrónica a los transistores conductores de la corriente (figura 56).



### 3.4.1 Programación PIC32

Se ha programado el microcontrolador desde el programa de desarrollo que facilita el fabricante MPLabIde, mediante código C. Ha sido necesario familiarizarse con las librerías que incluye el PIC y utilizar aquellas que son necesarias para el prototipo. En concreto se desarrollan pequeños programas para probar las librerías que usan en el programa final: entradas y salidas digitales, comunicación serie (UART), interrupciones y timers para generar señales PWM y lectura del convertidor A/D.

El programa realiza un control de posición proporcional, recibe una señal todo o nada de Matlab y activa el cable de nitinol, a través de las salidas digitales del puerto E, conectadas con la placa electrónica. La comunicación full-duplex se configura con los siguientes parámetros:

- velocidad a 115200 Baudios
- bit de parada a uno
- se configura que el dato es de 8 bits
- se configura con paridad impar

Se muestra un diagrama de flujos del funcionamiento del programa (figura 97).

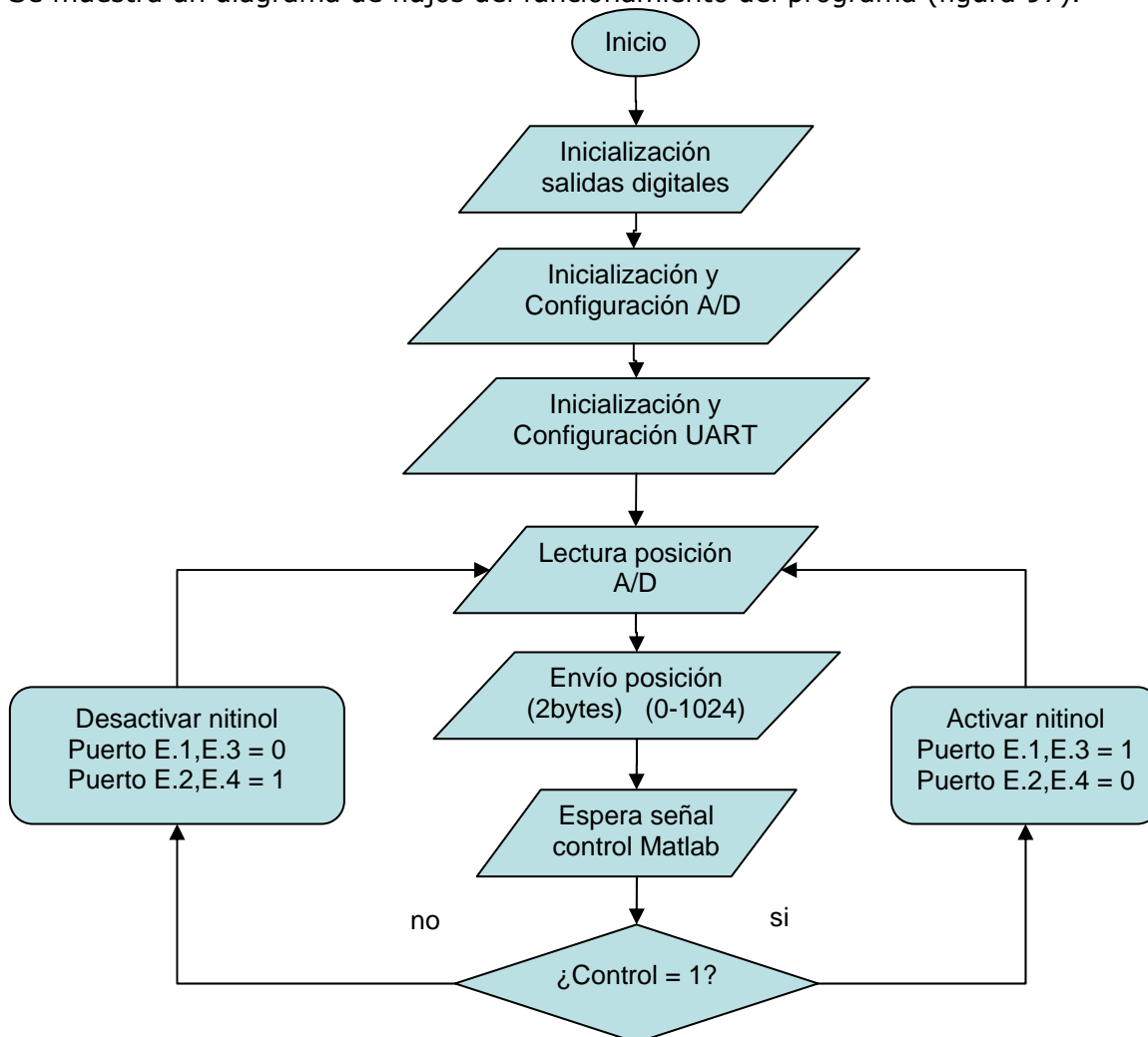


Figura 97. Diagrama de flujo del programa del PIC.

Como el error del sensor de giro es elevado, se introduce un error en la posición y para reducirlo eso se crean un filtro basado en la media y de cada 4 valores consecutivos, y



uno basado en la mediana. Con el filtro implementado basado en la media se obtienen los valores aceptables que se muestran en el apartado 4.

### 3.4.2 Programación en Matlab

Desde Matlab se obtiene la posición real del sistema, y se manda la señal de control en función del error. Se controla la trayectoria del dedo, cambiando la posición de referencia ( $p_j$ ) cada intervalo de tiempo establecido (2 seg).

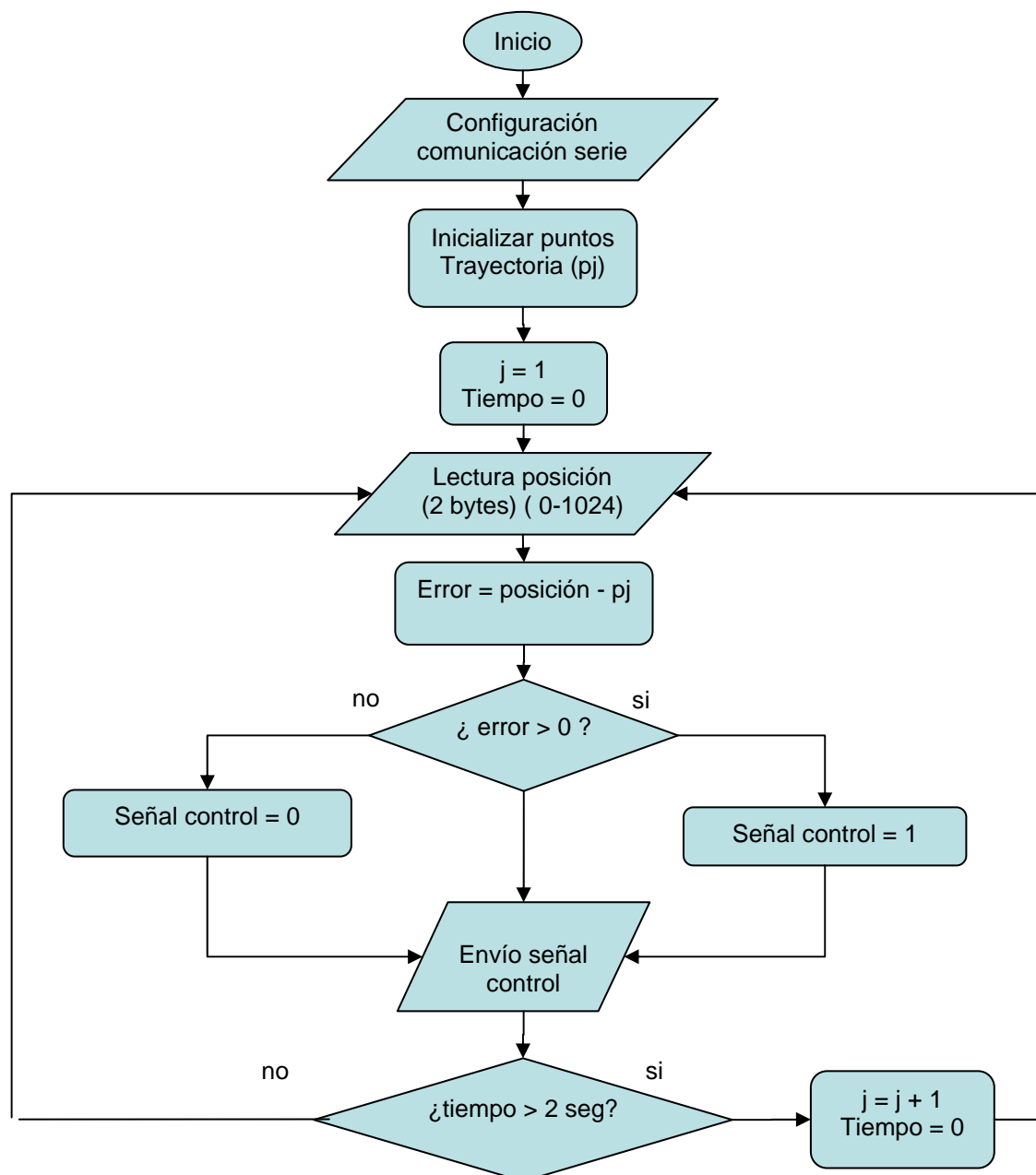


Figura 98. Diagrama de flujo del programa de Matlab.

La programación con Matlab permite obtener datos, guardarlos en forma de vector y realizar de forma sencilla gráficas a partir del tiempo y posición del sistema.



Debido al ruido que introduce el sensor de posición, ha sido imposible implementar la función derivada para realizar un control PID. Se realiza un control proporcional con el que se obtienen buenos resultados. En el apartado siguiente se incluyen los cálculos realizados del controlador PID, según la respuesta real del sistema.

### 3.4.3 Sintonización de un regulador PID mediante el método Ziegler-Nichols

Se propone un control PID siguiendo el método Zieger-Nichols. En lazo abierto la función de transferencia es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K_0 \cdot e^{-s\tau_0}}{1 + \gamma_0 \cdot s} \quad \text{Ecuación 12. Función de transferencia lazo abierto.}$$

Donde los coeficientes  $K_0$ ,  $t_0$  y  $\gamma_0$  se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en  $y(t)=y_0$  para  $u(t)=u_0$ . Se aplica una entrada escalón de  $u_0$  a  $u_1$  (el salto debe estar entre un 10% y un 20% del valor nominal) y se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación.

Los parámetros se pueden obtener con las expresiones siguientes:

$$\tau_0 = t_1 - t_0$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1$$

Ecuación 13. Coeficientes lazo abierto.

$$K_0 = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0}$$

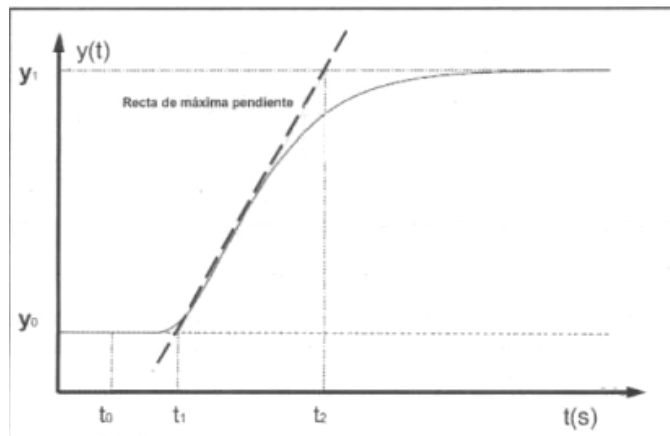


Figura 99. Respuesta teórica ante entrada escalón.

Según Ziegler-Nichols, la relación de estos coeficientes con los parámetros del controlador son:

$$K_p = 1.2 \cdot \frac{\gamma_0}{k_0 \cdot \tau_0}$$

$$T_i = 2 \cdot \tau_0$$

$$T_d = 0.5 \cdot \tau_0$$

Ecuación 14. Parámetros del controlador PID.



La función de transferencia en lazo cerrado con el controlador PID es la siguiente:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1-z^{-1}} + c \cdot (1-z^{-1}) \quad \text{Ecuación 15. Función de transferencia lazo cerrado.}$$

Dónde los coeficientes que interesan son:

$$a = K_p \quad b = \frac{K_p \cdot T}{T_i} \quad c = \frac{K_p \cdot T_d}{T} \quad \text{Ecuación 16. Coeficientes del controlador PID.}$$

Se propone un control PID en paralelo y se calculan los valores de los coeficientes a,b,c a partir de la respuesta del sistema obtenido en las pruebas del sistema simple completo. Se acciona el sistema hasta la máxima posición correspondiente con un giro aproximado de  $100^\circ$  y un valor decimal del sensor de 780. Se toma un período de muestreo  $T=1\text{ms}$  según el criterio:

$$T < \frac{\tau_0}{4} \quad \text{Ecuación 17. Criterio tiempo de muestreo.}$$

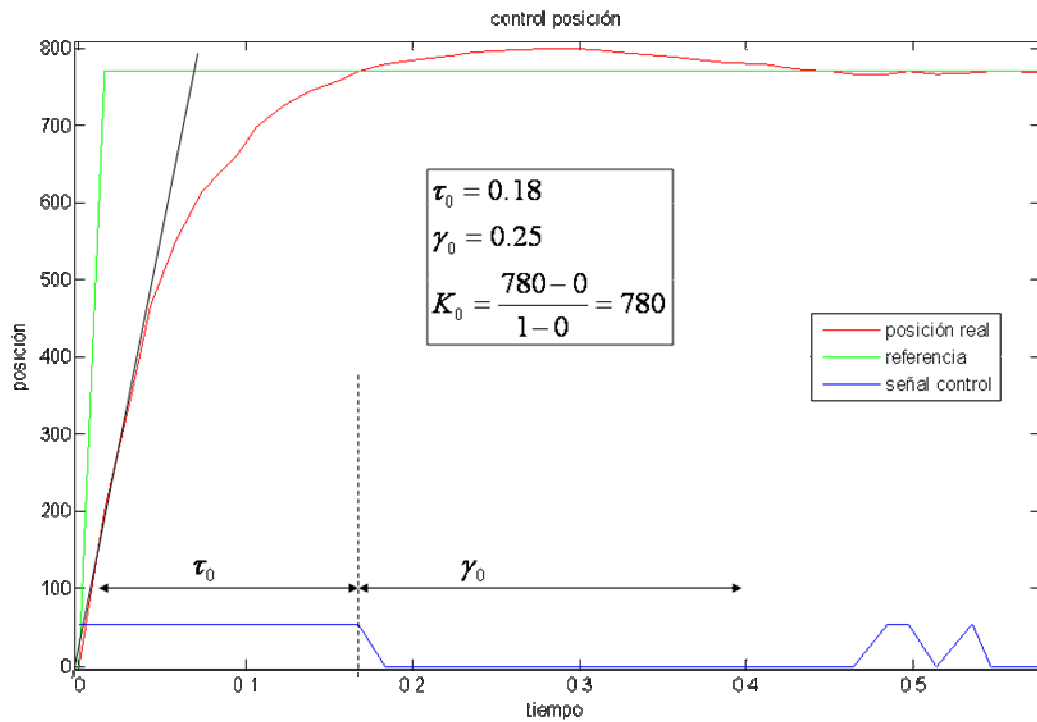


Figura 100. Respuesta sistema real con control proporcional. Cálculo coeficientes del sistema.

$$K_p = 1.2 \cdot \frac{0.18}{780 \cdot 0.25} = 0.011$$

$$T_i = 2 \cdot 0.25 = 0.5$$

$$T_d = 0.5 \cdot 0.25 = 0.125$$



Los coeficientes finales a,b,c quedan:

$$a = 0.011$$

$$b = \frac{0.011 \cdot 0.001}{0.5} = 2.2 \cdot 10^{-5}$$

$$c = \frac{0.011 \cdot 0.125}{0.001} = 1.37$$

Aunque se realice un control preciso PID, existirá aún la limitación que supone el tiempo de respuesta del cable de nitinol. Teóricamente es de 1ms pero en la práctica, se han obtenido valores de 0.06 segundos de contracción del cable. Este tiempo es para un cable de 280mm y 0.51 mm de diámetro con una corriente aplicada de 4A.



## 4 Pruebas experimentales del prototipo

---

Análisis del funcionamiento del prototipo final. Resultados y gráficas.

## 4.1 Resultados del sistema completo

Una vez fabricado el prototipo y comprobado el funcionamiento del sistema mecánico y electrónico de forma individual, se realizan los primeros ensayos del sistema simple completo. Se monta el sistema con un cable de nitinol de 0.15mm de diámetro y el muelle 3 descrito en el capítulo anterior, en la estructura soporte de metacrilato. Se ha seleccionado el cable de nitinol de un menor diámetro para poder comprobar la controlabilidad, ya que este cable más fino ofrece un tiempo de enfriamiento inferior 2 segundos, a pesar de ofrecer una fuerza también menor de sólo 300 gramos máximos. El sistema completo se muestra a continuación (figura 101).

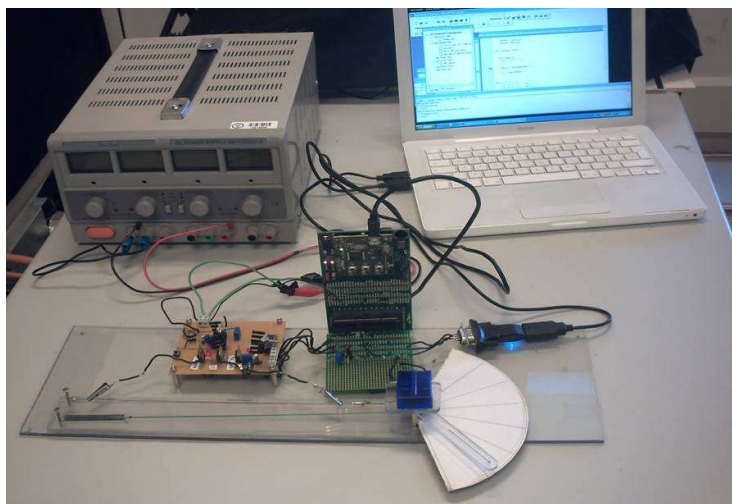


Figura 101. Sistema completo. Estructura con cable de nitinol, muelle y correa. Placa electrónica. Sensor. PIC y placa expansión. Fuente de alimentación. PC.

El elemento fundamental del sistema mecánico del prototipo es la aleación elegida de Niti. Después de un uso continuado en condiciones extremas, para cada uno de los diámetros, el material conserva todas las propiedades. No se han manifestado síntomas de fatiga y la velocidad de enfriamiento y calentamiento permanecen estables. La longitud deformada durante el calentamiento no varía con el uso, y la longitud inicial también permanece constante. El único y principal inconveniente es el tiempo de enfriamiento de la aleación. Se ha logrado disminuir este tiempo aplicando presión sobre el hilo en el mismo sentido de la recuperación de forma. Se han aplicado 26 MPa de los 25 MPa teóricos, y con esta presión se ha disminuido el tiempo máximo del cable de 0.15mm de 2 segundos a intervalos de 0.6 a 1 segundo, según la deformación. Se trata de unos valores muy positivos que motivan a continuar estudiando qué tipo de muelle es idóneo para aumentar la velocidad de enfriamiento.

Los otros elementos del sistema mecánico, formado por eje, polea y rodamientos se ha montado e integrado fácilmente en la estructura el actuador. Se han obtenido rozamientos mínimos, y un peso de los elementos muy reducido, pues se trata de dimensiones características inferiores a 1 cm. El muelle utilizado ha tenido un buen comportamiento, y ha funcionado dentro de los límites elásticos. No ha sufrido deformaciones permanentes ni se perciben cambios en las propiedades. El metacrilato utilizado para fabricar la estructura ha sido un material idóneo para la fabricación manual de las piezas debido a su fácil mecanización. Se han realizado procesos de corte, taladrado y avellanado de forma manual.

Respecto al sistema electrónico, la placa electrónica de conmutación de la corriente para el control de dos cables de nitinol, conmuta perfectamente la corriente y funciona con valores nominales de 5 A sin problemas. Las pruebas detalladas en el capítulo anterior han sido un éxito, y el circuito queda preparado para realizar pruebas con un sistema doble. El único problema existente es el calentamiento de los transistores. Los





disipadores utilizados han sido suficientes, pero funcionan en el límite de su capacidad. El sensor utilizado se comporta bien dentro de sus limitaciones, pero introduce un ruido elevado, que no ha permitido calcular la función derivativa, para implementar un regulador PID. Es el sensor más pequeño encontrado, pero aún así, el mayor problema ha sido reducir aún más sus dimensiones para acoplarlo a una polea de 8mm. El microcontrolador PIC32 es un chip muy avanzado que ofrece prestaciones muy elevadas para el control de un sólo actuador, la frecuencia de 80Mhz es suficiente. La comunicación bidireccional entre Matlab y el PIC queda preparada para desarrollar algoritmos desde Matlab usando Simulink, y los problemas existentes de adaptación de señal del puerto serie en la entrada del microcontrolador se han solucionado, con un chip adaptador de señal TTL232.

El control proporcional desarrollado es muy sencillo pero resulta suficiente para tener una idea de las posibilidades del actuador. La respuesta del sistema es rápida y con una pequeña sobreoscilación que es fácilmente corregible con regulador PID como el calculado en el apartado 3.4.3.

## 4.2 Resultados de las pruebas de control

Se programa el dispositivo para que el dedo se mueva a tres puntos del espacio correspondientes con giros de  $10^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $100^\circ$ , y mantenga la posición varios segundos. Estos valores corresponden con un valor decimal del sensor de 86, 386 y 768 correspondientemente. Se realiza un control de posición proporcional, ya que no ha sido posible realizar un control PID, pues el ruido que introduce el sensor es muy elevado y es imposible calcular la función derivativa.

Se muestran las gráficas correspondientes a la trayectoria, a lo largo de la cual se puede comprobar que se produce el calentamiento y enfriamiento consecutivo del nitinol (figura 102). Se toman además medidas de de posición, error, velocidad angular y lineal en tiempo real, para analizar los resultados.

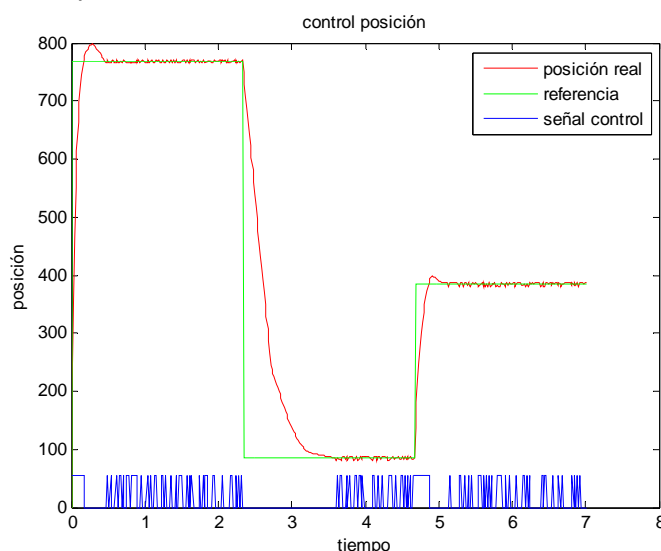


Figura 102. Respuesta sistema con sistema de control simple.

Se comprueba en la figura anterior que la respuesta del sistema con un control proporcional, se ajusta de manera correcta a la posición de referencia. A partir de esta gráfica se analizan los factores fundamentales que influyen en el comportamiento del actuador. El tiempo de respuesta del nitinol para completar la transformación austenítica hasta girar el dedo  $90^\circ$ , para una corriente aplicada de 4A y un cable de máximo diámetro ha sido aproximadamente de 0.25 segundos (figura 103). Este giro equivale a una deformación aproximada del 4% alcanzada por el cable de nitinol. El tiempo obtenido es superior al teórico que facilita el fabricante de 0.001 segundos. Este



tiempo podría reducirse si se aplicase un pico de corriente superior a la corriente nominal de 4A que soporta el cable. Este pico de corriente debe ser de tiempo mínimo y existe un alto riesgo de quemar la aleación y deformarla permanentemente.

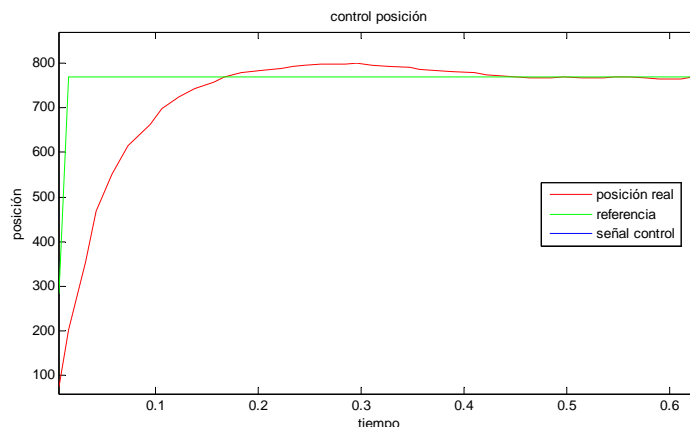


Figura 103. Detalle figura 102. Tiempo de respuesta para una deformación del 4%,  $I=4$  A,  $\Phi=0.51$  mm.

Durante la fase de calentamiento se puede realizar un control preciso para asegurar la rapidez del sistema y un error mínimo. El mayor problema existente, como ya se comentó en el capítulo 1 y 2, es el proceso de enfriamiento. El tiempo teórico para el cable utilizado es de 2 segundos, y experimentalmente se realiza el proceso de transformación martensítica en aproximadamente 0.8 segundos (figura 104). Este aumento de la velocidad de enfriamiento se debe a la tracción ejercida por el muelle. Este tiempo es aún demasiado elevado y será necesario estudiar distintas soluciones para reducirlo, mediante refrigeración con líquido termo conductor, flujo de aire forzado, etc.

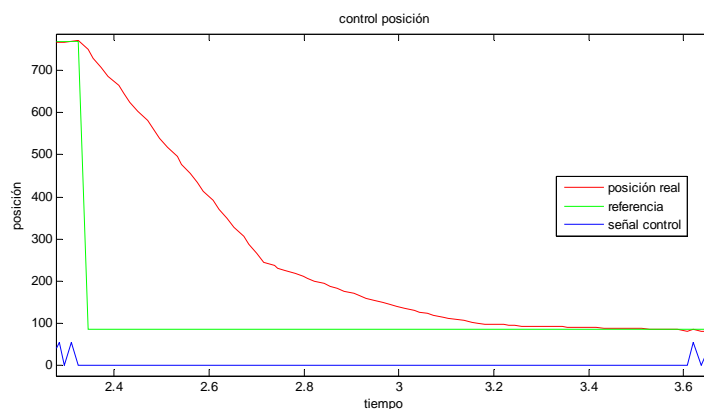


Figura 104. Detalle figura 102. Proceso de enfriamiento. Recuperación de forma durante la transformación martensítica.

Otro parámetro analizable es el error de posición existente. Debido a la baja sensibilidad conseguida con el sensor y al control sencillo del sistema, existe una pequeña variación respecto la referencia que se aprecia de manera visual durante las pruebas experimentales. En la siguientes figuras (figura 105) se puede comprobar que el error se mantiene cercano al 5%, y que puede reducirse aplicando un mejor control y con un sensor efecto Hall o encoder relativo de elevada sensibilidad.

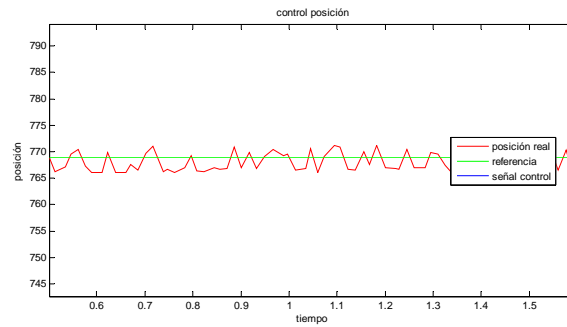


Figura 105. Detalle figura 102. Posición real y referencia con control simple.

En la figura siguiente se muestra el error existente en la posición (figura 106 y 107). Se observa que el error es máximo cuando la posición depende del proceso de enfriamiento (1.3 s), en el trayecto del punto 3 al 1 ( $100^\circ$  a  $90^\circ$ ). Durante el período de calentamiento para ir del punto inicial al 3 ( $0^\circ$  a  $100^\circ$ ) y del punto 1 al 2 ( $10^\circ$  a  $45^\circ$ ) existen otro dos picos en la gráfica, pero esta vez el error es menor y de menor duración. En este caso el tiempo de respuesta depende de la velocidad de respuesta del nitinol al calentamiento, que es mucho mayor. En cualquiera de los casos, una vez alcanzada la posición de referencia el error no supera el 5%.

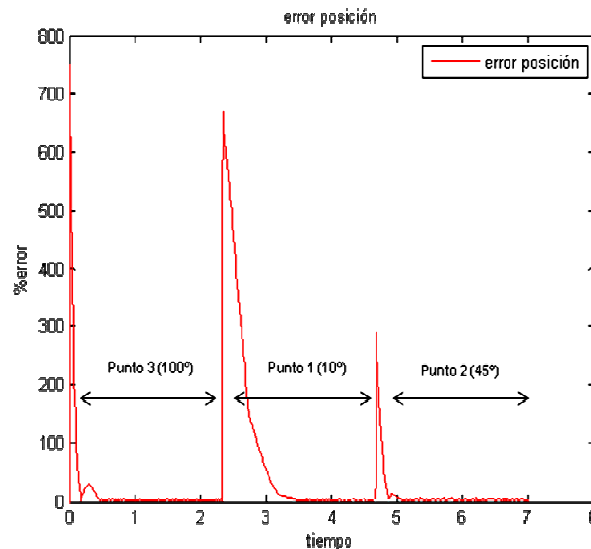


Figura 106. Error de posición del sistema.

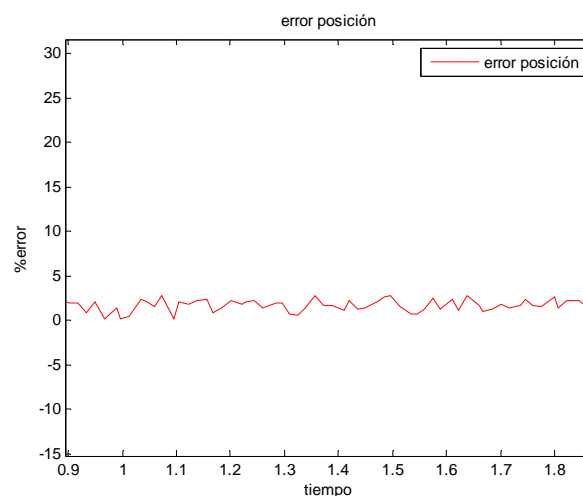


Figura 107. Detalle figura 106. Error de posición no superior 5%.



Se analiza la velocidad angular instantánea de la polea (figura 108). Se obtiene un pico de la velocidad durante el alcance del punto 3 y 1, obteniendo un valor máximo de 22 rad/s. La velocidad resulta negativa durante el enfriamiento y recuperación de una posición inferior (punto 2).

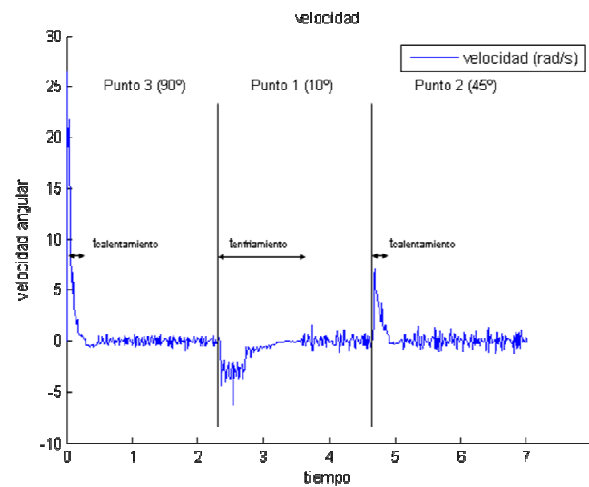


Figura 108. Velocidad angular de la polea.

En la figura siguiente se muestra la velocidad lineal instantánea de la polea y en el extremo del dedo (figura 109). La gráfica es igual a la anterior, simplemente multiplicada por la constante de la longitud del dedo.

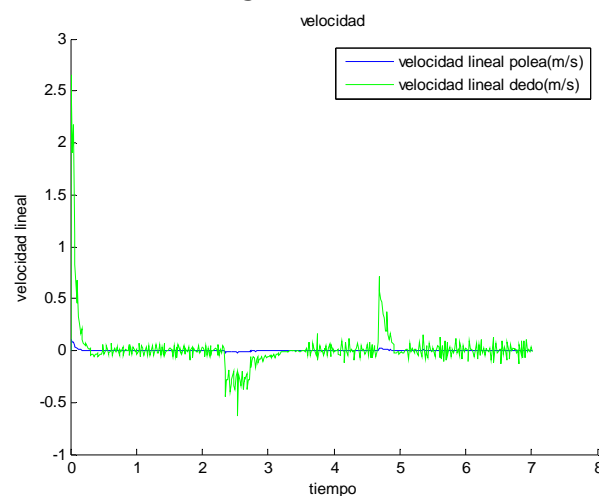


Figura 109. Velocidad lineal de la polea y en el extremo del dedo.



## 5 Conclusiones y trabajos futuros

---

Análisis de las conclusiones obtenidas, consideraciones, propuestas y mejoras del prototipo actual para las posteriores versiones.



## 5.1 Conclusiones generales

El objetivo principal de este apartado es analizar la viabilidad de crear un actuador basado en una aleación SMA, como alternativa a los sistemas convencionales. Se desea que el prototipo creado sirva de base para realizar un estudio más profundo del nuevo sistema y lograr solucionar las limitaciones existentes.

Después de realizar un estudio del estado del arte referente a sistemas de actuación, se ha comprobado que a día de hoy se han llevado a cabo pocas investigaciones sobre materiales SMA y en concreto se han desarrollado muy pocos prototipos de actuadores que utilicen esta tecnología. Los pocos estudios existentes son muy primitivos y sólo existe uno que ha implementado de manera experimental un sistema en lazo de cerrado. Existen distintas soluciones o propuestas teóricas para reducir el elevado tiempo de enfriamiento de la aleación, pero no se han obtenido resultados aceptables mediante pruebas con un prototipo real.

Por estos motivos, es importante el desarrollo del prototipo que se ha llevado a cabo, ya que se trata de un banco de pruebas para investigar esta tecnología. Partiendo siempre del diseño y simulación por ordenador de cada subsistema y después de comprobar el funcionamiento de cada una de las partes, se ha montado el sistema completo y realizado los ajustes necesarios para el funcionamiento del actuador. Se han realizado pruebas de control utilizando un regulador proporcional. Éste ha sido suficiente para obtener una respuesta rápida, con poca sobreoscilación y un error relativamente pequeño en condiciones de poca carga en el eje. Se han conseguido resultados aceptables teniendo en cuenta que se trata del primer prototipo. Por otra parte, se ha conseguido diseñar un sistema de reducidas dimensiones, poco peso y un consumo menor que los motores empleados en muchas manos robóticas como la Shadow Dexterous Hand (48W frente a 22W del sistema propuesto).

Durante el diseño e implementación del sistema se han identificado distintos problemas. En cuanto al diseño electrónico, con el objetivo de reducir la corriente total en paralelo, ha resultado difícil la ampliación del circuito para la conmutación de mayor número de músculos, debido a la complejidad que supone. Ha resultado difícil encontrar un sensor de giro preciso, de reducidas dimensiones y con bajo rozamiento disponible en el mercado, para poder ser acoplado en el eje, por ello se ha optado por una opción de potenciómetro. En relación al control del sistema, se necesita una señal de control en forma de picos de corriente para obtener un tiempo de respuesta bajo. Otra solución pasa por utilizar un algoritmo de estimación de la temperatura. Esto supone un riesgo importante de dañar el cable de nitinol.

Sólo si se encuentran soluciones sencillas a estas limitaciones, que no aumenten la complejidad del sistema en exceso, se puede decir que los SMA representan una verdadera alternativa como actuador.

## 5.2 Trabajos futuros

Respecto a la aleación de nitinol, es importante realizar un estudio térmico del comportamiento del material en el sistema. El flujo térmico, que existe por convección con el aire del ambiente, no es suficiente. Es importante encontrar soluciones para aumentar este flujo y disminuir el tiempo de enfriamiento. Algunas propuestas como las siguientes pueden ser la solución:

- Sumergir el cable en un líquido termoconductor. Por tanto se propone mejorar el banco de pruebas para que se puedan probar estos refrigerantes. Según indica



el fabricante, el uso de aceite reduce el tiempo 25 veces y el *glicol* (HO-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-OH) puede disminuirlo hasta 100 veces.

Se advierten de los problemas que conlleva sumergir el cable en un líquido como método de refrigeración:

- El modelo dinámico del sistema cambia al estar sumergido el cable en un líquido. Se necesita un método para suministrarle corriente eléctrica, y garantizar la estanqueidad del sistema.
- Si se realiza un circuito térmico equivalente del nuevo sistema, se puede calcular el volumen de líquido refrigerante necesario que debe envolver al cable. Este valor puede ser crítico para la integración de cables de nitinol sumergidos en líquido, dentro de una mano robótica. El espacio disponible y el peso deben de ser mínimos, por lo que la fabricación de la mano puede ser demasiado compleja.
- Las condiciones externas son muy variables y pueden cambiar el comportamiento térmico del líquido según varíen la temperatura y presión del ambiente.
- Otra solución distinta puede ser la utilización de varios cables de nitinol de menor diámetro en paralelo. De esta manera se consigue un desplazamiento por deformación y fuerza equivalentes a los desarrollados por un cable de mayor diámetro. La ventaja que se obtiene es un tiempo de enfriamiento menor para cada uno de los cables. También es necesario un estudio térmico en este caso, para calcular el flujo térmico en función del número de cables y distancia entre ellos.
- Una solución puede ser integrar en el sistema una celda Peltier para aumentar el flujo de calor evacuado. Sería necesario estudiar la necesidad de añadir un ventilador para aumentar el flujo y conseguir una convección forzada.
- Por último se propone utilizar un sistema con doble muelle y dos cables de nitinol en configuración antagónica. Con esta configuración, se dedica un conjunto muelle-nitinol para realizar fuerza en cada sentido. De esta manera siempre hay un cable disponible para realizar el movimiento de vuelta, ejercer una presión sobre el cable que se está enfriando y reducir este tiempo. Además resulta muy sencillo controlar la impedancia.

Respecto al sistema mecánico formado por cable de nitinol, muelle, correa y polea, se propone realizar un estudio mecánico que permita calcular que muelle es el óptimo para minimizar el tiempo de enfriamiento, pero no disminuir en exceso la fuerza útil que desarrolla el actuador.

Respecto al circuito electrónico diseñada, se propone construir una nueva placa de reducidas dimensiones con la tecnología PCB, ya que la placa actual fabricada ha sido para pruebas. Con este fin se ha facilitado el layout con los footprint adecuados. Se ha considerado la necesidad futura de aumentar el número de músculos a controlar y se han simulado circuitos para la conmutación de 4, 6 y 8 cables de nitinol. El problema existente es el aumento de la tensión  $V_{gs}$  necesaria de activación según aumenta el número de transistores en serie, por lo que se propone encontrar una solución y diseñar un circuito conmutador para todas las articulaciones de una mano, reduciendo la tensión  $V_{cc}$  necesaria. Existe una limitación entre el tamaño de los disipadores y el de la placa. Si se pretende reducir el tamaño de este sencillo circuito, es conveniente hacer un estudio térmico de los componentes y asegurarse que el funcionamiento tendrá lugar en condiciones inferiores a las nominales. Una mejora que se ha diseñado y simulado es un regulador de corriente y tensión, pero la implementación ha sido difícil por motivos técnicos y se propone su continuación. Se han realizado pruebas con



circuitos sencillos y resistencias bobinadas de baja impedancia (0.1, 0.2 ohmios) que se espera puedan ser útiles para dicho trabajo de continuación propuesto.

Para mejorar el control de posición con la implementación de un regulador PID, es utilizar un sensor Hall de alta sensibilidad que se acople al eje sin aumentar el rozamiento. Una alternativa a este sensor, es un encoder relativo con un disco de pequeño diámetro, que envíe los datos a través del protocolo CAN Bus al PIC. Si en un futuro se pretende realizar un control de muchos músculos, la velocidad del puerto serie puede ser una limitación para conseguir un ciclo de control reducido. Se propone utilizar el protocolo USB para la comunicación entre Matlab y el PIC. Matlab tiene librerías (Visa-Usb) que integran este protocolo y el microcontrolador PIC incluye también este protocolo, el hardware y las conexiones en la placa de desarrollo necesarias.





## 6 Bibliografía

---



## 6.1 Sitios web

[www.google.es](http://www.google.es)  
[www.dynalloy.com](http://www.dynalloy.com)  
[www.fairchild.es](http://www.fairchild.es)  
[www.rs-online.es](http://www.rs-online.es)  
[www.shadowrobot.com/hand/overview.shtml](http://www.shadowrobot.com/hand/overview.shtml)  
[axxon.com.ar/rob/Actuadores\\_manos.htm](http://axxon.com.ar/rob/Actuadores_manos.htm)  
[www.nitisurgical.com/](http://www.nitisurgical.com/)  
[tienda.acens.com/](http://tienda.acens.com/)  
[www.medgadget.com/spanish/2008/09/valvula\\_mitral\\_edwards\\_perimou\\_1.html](http://www.medgadget.com/spanish/2008/09/valvula_mitral_edwards_perimou_1.html)  
[www.robotsperu.org/foros/high-speed-robotic-hand-vp6313.html](http://www.robotsperu.org/foros/high-speed-robotic-hand-vp6313.html)

## 6.2 Referencias

- 1 [http://salud.kioskea.net/contents/diabete/01\\_definitions\\_et\\_statistiques.php3#las-estadisticas-de-la-diabetes](http://salud.kioskea.net/contents/diabete/01_definitions_et_statistiques.php3#las-estadisticas-de-la-diabetes)
- 1' Olander, A. Z. Kristall 83 (A). 145.
- 2 Greninger, A.B.; Mooradian, V.G. Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys. Trans. AIME. 128. pp. 337-368.
- 3 Kurdjumov, G.V. J.of Metal. 449(7).
- 4 Chang, L.C.; Read, T.A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals: the gold cadmium beta phase. Trans. AIME. 191 (47).pp.47-52.
- 5 Buehler, W.J.; Wang, F.E. A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. Ocean Eng.pp.105-120.
- 6 Wayman, C.M. Duering, T.W. An introduction to martensite and shape memory. Engineering aspects of shape memory alloys. Ed. T.W. Duering; K.N. Melton; D.Stöckel; C. M. Wayman. Butterworth- Heinemann. London. pp 3-20.
- 7 Harrison, J.H. Measurable changes concomitant with the shape memory transformations. En Engineering aspects of shape memory alloys. Ed. T.W. Duering; K.N. Melton; D.Stöckel; C. M. Wayman. Butterworth- Heinemann. London. pp 106-115.
- 8 Otsuka, K.; Ren, X. Recent developments in the research of Shape Memory Alloys. Intermetallics 7. pp 511-528.
- 9 Van Humbeeck, J. Non medical applications of Shape Memory Alloys. Materials Science and Engineering. A273 275. pp. 134-148.
- 10 Schetky, L.McD. The industrial applications of Shape memory alloys in North America. Materials Science Forum Vols. 327-328 pp 9-16.
- 11 Dolce, M; Cardone, D. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion. International Journal of Mechanical Sciences 43(11). pp 2631-2656.
- 12 Mantovani, D. Shape Memory Alloys: properties and biomedical applications. JOM. 52(10). pp-36-44.
- 13 Norma H 7001 JIS. Glossary of Terms used in Shape Memory Alloys. Norma H 7101 JIS. Method for Determining the Transformation Temperatures of Shape Memory Alloys. Norma H 7103 JIS. Method of fixed temperature tensile test for wires of NiTi Shape Memory Alloys. Norma H 7104 JIS. Method of fixed temperature load test for coil spring of Shape Memory Alloys. Norma H 7105 JIS. Method of fixed strain test for coil spring of Shape Memory Alloys. Norma H 7106 JIS. Method of fixed strain thermal cycling test for coil spring of Shape Memory Alloys.
- 14 Norma ASTM F2005-00. Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys. Norma ASTM F2063-00. Standard Specification for Wrought Nickel- Titanium Shape Memory Alloys for Medical Devices and Surgical Implants. Norma ASTM F2082-03. Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys for bend and free Recovery.



- 15 P. Krulevitch, A.P.Lee, P.B. Ramsey, J.C. Trevino, J. Hamilton, M.A. Northrup, Thin Film.
- 16 S. Hirose, K. Ikuta, Y. Umetani: "A new design method of servo-actuators based on the shape memory effect", in "Theory and Practice of Robots and Manipulators" Proc. Of RoManSy '84, The Fifth CISMIFToMM Symposium, Hermes Publishing, pp. 339-349, 1985.
- 17 K. Ikuta, M. Tsukamoto. S. Hirose: "Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope". Proc. Of 1988 IEEE Robotics and Automation, pp. 427-430, 1987, Philadelphia, PA.
- 18 Diseño y control de actuadores basados en materiales con memoria de forma. Estibalitz Asua, Victor Etxebarria y Alfredo García-Arribas. Departamento de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU.
- 19 IKUTA, K., TSUKAMOTO, M. and HIROSE, S. Shape memory alloys: servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope. En: Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, 1988. Washington: Computer Society Press.
- 20 Cables musculares. Alejandro Gómez y Carlos Andrés Restrepo. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 4 p. 103-111. Noviembre 2005. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).
- 21 K. Kuribayashi: "A new actuator of a joint mechanism using TiNi alloy wire", Int. J. Robotics Res., Vol. 4, NO. 4, pp. 47-58, 1986.
- 22 Numerical thermomechanical modelling of shape memory alloy wires. H. Meier y L. Oelschlaeger.
- 23 Guevara, J. A.; Flores, J. C.; Mocenahua, D. Robot con alambre muscular "GJ-M", Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP, septiembre 2002.
- 24 Guevara, J. A.; Flores, J. C.; Mocenahua, D. Robot con alambre muscular "GJ-M", Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP, septiembre 2002. Martínez y Cárdenas, J. R.; Diego, F.; Claris, T. B.; Murcio, I. A., Implementación de un sistema motriz con alambres musculares y controlado por un microcontrolador Atmega16, Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- 25 A SMA high performance actuator for robot hands. D. REYNAERTS and H.van BRUSSEL
- 26 M. Hashimoto, M. Takeda, H. Sagawa, I. Chiba, K. Sato: "Application of shape memory alloy to robotic actuators". Journal of Robotic Systems, V01.2, No.1. pp. 3-25, 1985.
- 27 BERGAMASCO M., SALSEDO F., DARIO P., A linear SMA motor as direct drive robotic actuator, IEEE Conf. Rob. Aut., 1989.
- 28 P. Dario, M. Bergamasco, L. Bemardi, A. Bicchi: "A SMA actuating module for fine manipulation", Proc. Of IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop, nov. 9-11, 1987, Hyannis, MA.
- 29 M. Bergamasco, F. Salsedo, P. Dario: "Shape memory alloy micromotors for direct drive actuation of dexterous artificial hands", Sensors and Actuators, Vol.17, No. 1/2, pp. 115-119, Elsevier Sequoia, Lausanne. 1989.
- 30 Reynaerts. D.; Van Brussel, H., A SMA high performance actuator for robot hands, Katholieke Universiteit Leuven.
- 31 Rediniotis, O. K.; Lagoudas, D. C., Shape memory alloy actuators as locomotor muscles, Texas A&M University.
- 32 Shin, D. D.; Mohanchandra, K. P.; Carman, G. P., Development of hydraulic linear actuator using thin film SMA, University of California at Los Angeles.
- 33 Hunter, I. W.; Lafontaine, S.; Hollerbach, J. M.; Hunter, P. J., Fast reversible NiTi.
- 34 Schetky, L.McD. The industrial applications of Shape memory alloys in North America. Materials Science Forum.



35 Cables musculares. Alejandro Gómez y Carlos Andrés Restrepo. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 4 p. 103-111. Noviembre 2005. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).

36 Tesis departamento de materiales. Universidad politécnica de Catalunya. Título: Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. Autor: de la Flor López, Sílvia.

37 Tesis de ingeniería electrónica y control. Título : Diseño y construcción de una mano robótica controlada mediante un guante sensorizado. Autor: Pilaquinga Abadiano, Diego Iván.

## 7 Anexos

---



## 7.1 Presupuesto investigación

Duración proyecto: octubre '09 – octubre '10

	Ud/horas	Precio ud	SubTotal	Total
--	----------	--------------	----------	-------

<b>Coste de mano de obra</b>				<b>2,700.00 €</b>
Documentación	16	18.00 €	288.00 €	
Diseño y simulación	25	18.00 €	450.00 €	
Fabricación y montaje	20	18.00 €	360.00 €	
Integración sistemas	12	18.00 €	216.00 €	
Programación	22	18.00 €	396.00 €	
Medidas y pruebas	10	18.00 €	180.00 €	
Redacción del documento	45	18.00 €	810.00 €	

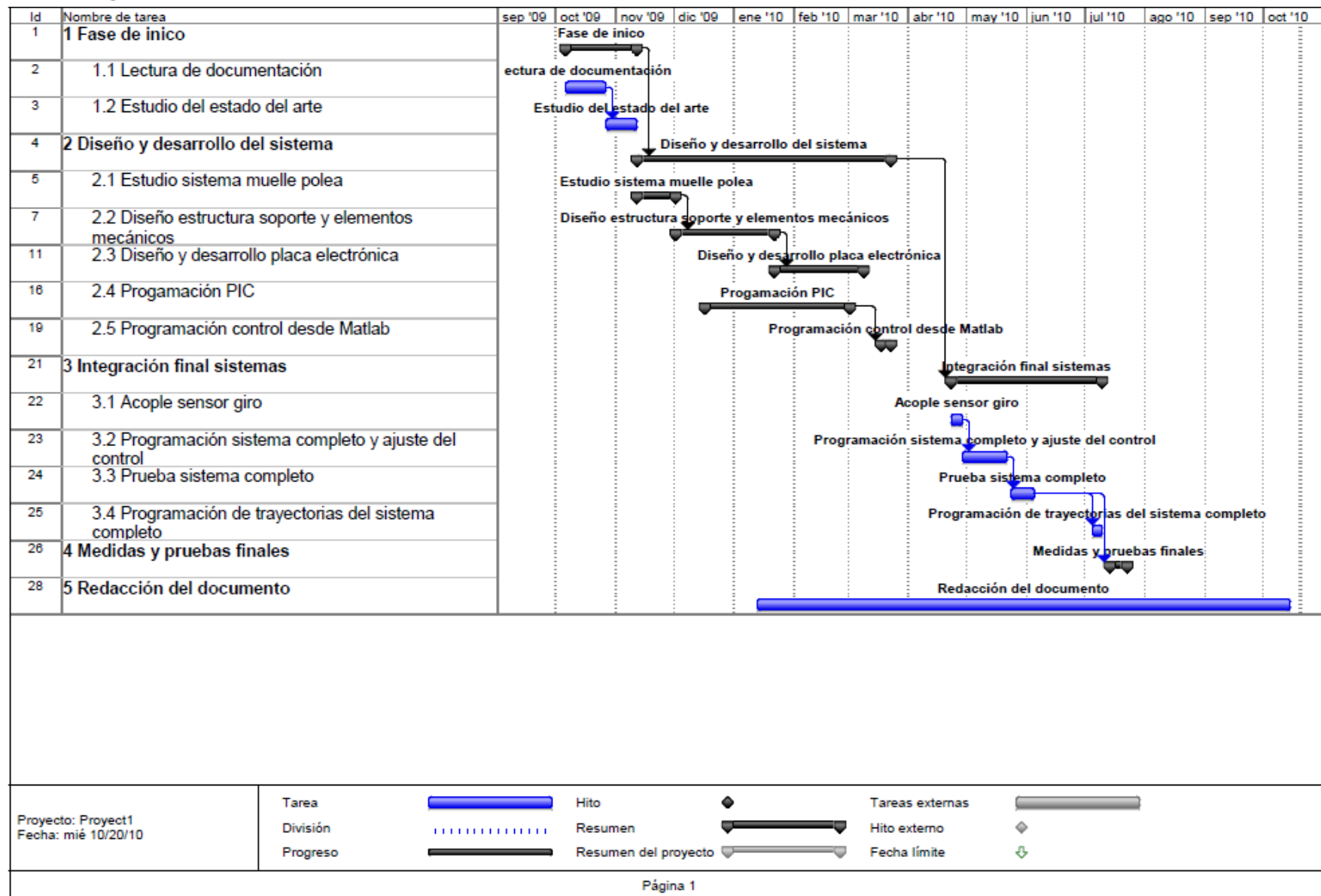
<b>Coste de material</b>				<b>288.97 €</b>
<b>Carretes flexinol</b>				<b>56.79 €</b>
carrete 5 m 0.51 mm	1	21.38 €	21.38 €	
carrete 5 m 0.2 mm	1	16.25 €	16.25 €	
carrete 10 m 0.13 mm	1	19.17 €	19.17 €	
<b>Estructura</b>				<b>81.60 €</b>
Plancha Metacrilato 3mm (1x2 m)	1	30.00 €	30.00 €	
Polea 8mm	2	4.18 €	8.36 €	
Rodamiento de bolas RJ-3332	4	2.54 €	10.16 €	
Eje rectificado 2.3 mm	2	5.23 €	10.46 €	
Muelles de 3 mm diámetro	3	1.02 €	3.06 €	
Muelles de 6 mm diámetro	4	1.25 €	5.00 €	
Muelles de 9 mm diámetro	3	1.52 €	4.56 €	
Material para mecanizado manual	1	10.00 €	10.00 €	
<b>Hardware</b>				<b>150.58 €</b>
Microchip PIC 32 y placa desarrollo	1	63.99 €	63.99 €	
Sensor Crouzet mod:89120302	1	34.59 €	34.59 €	
Transistores IRF530	20	0.85 €	17.00 €	
Resto de elementos electrónicos	1	25.00 €	25.00 €	
Material para montaje electrónico	1	10.00 €	10.00 €	
<b>Software (licencias)</b>				<b>0.00 €</b>
MpLabIDE	1	0.00 €	0.00 €	
Matlab r9	1	0.00 €	0.00 €	
solid-Edge v19	1	0.00 €	0.00 €	
Orcad Capture 16.0	1	0.00 €	0.00 €	

<b>TOTAL INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO</b>				<b>3,277.94 €</b>
---	--	--	--	-------------------

DEL PROTOTIPO				
---------------	--	--	--	--

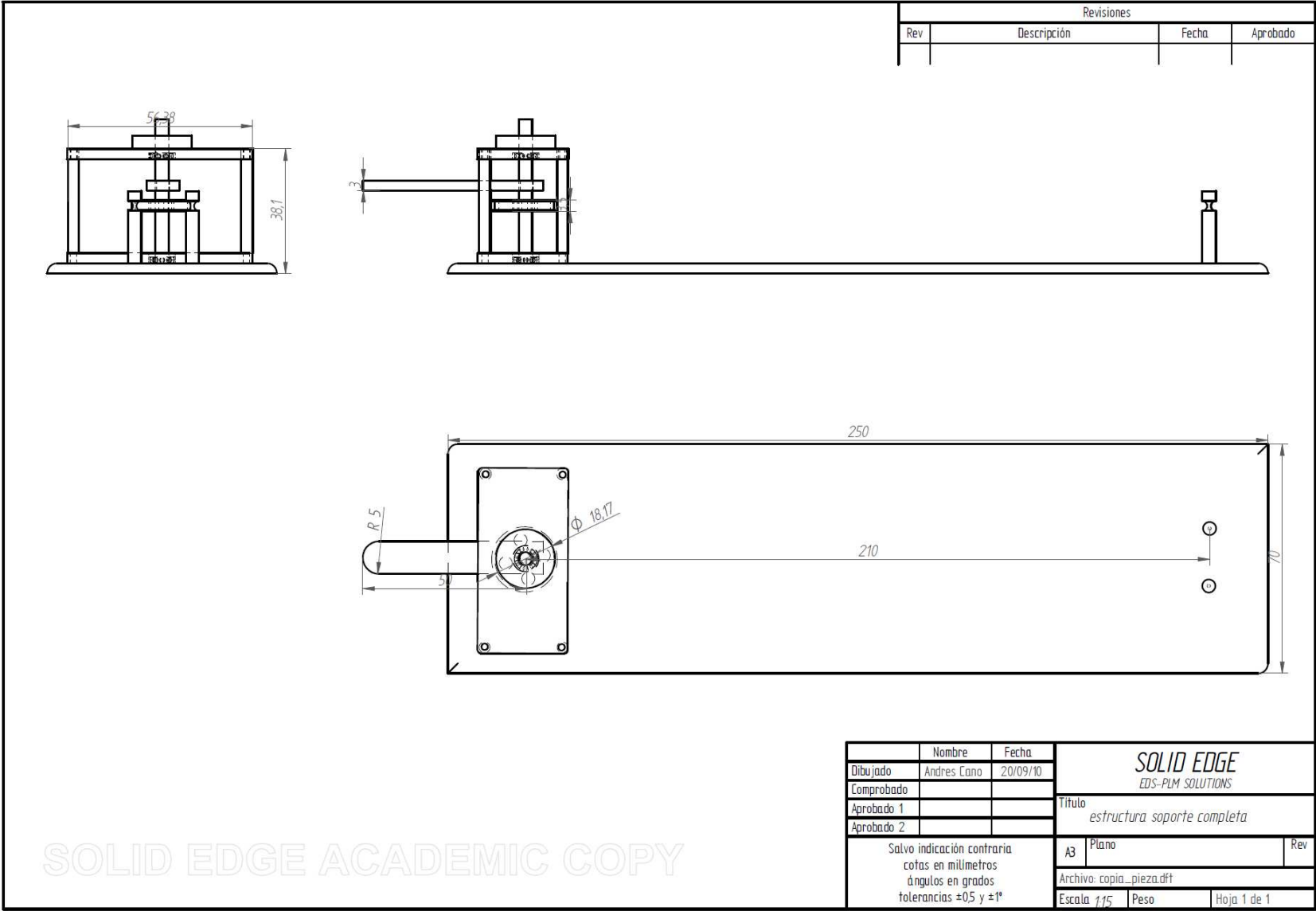


## 7.2 Diagrama Gantt





7.3 Estructura





## 7.4 Software utilizado

1. Orcad Capture Cis. Diseño y simulaciones del circuito electrónico
2. Solid Edge. Diseño mecánico y generación planos de la estructura de soporte.
3. MPLab Ide. Programación del microcontrolador PIC32.
4. Matlab. Implementación del control y obtención de los datos del sistema.

## 7.5 Código C programa PIC

```
#include "db_utils.h"
#include <plib.h>
#include <stdio.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <plib.h>

// Configuración frecuencia Microprocesador
// SYSCLK = 72 MHz (8MHz Crystal/ FPLLIDIV * FPLLMUL / FPLLODIV)
// PBCLK = 36 MHz
// Primary Osc w/PLL (XT+,HS+,EC+PLL)
// WDT OFF

#pragma config FPLLMUL = MUL_18, FPLLIDIV = DIV_2, FPLLODIV = DIV_1, FWDTEN
= OFF
#pragma config POSCMOD = HS, FNOSC = PRIPLL, FPBDIV = DIV_2

#define SYSCLK      (72000000)
#define PBCLK      (SYSCLK/2)

//velocidad serie a 115200 bps
#define DESIRED_BAUDRATE      (115200)

//*****variables comunicación*****////

#define BAUD_VALUE ((PBCLK/16/DESIRED_BAUDRATE)-1)
unsigned int errorValue,i=0,n[255],num[255],dato[500],k;
char hola,data;
unsigned char dat;
char GetMenuChoice(void);

int recibir(void);
int enviar(int);

unsigned int channel0,timer1,contador=0;// conversion result as read from result buffer
unsigned int channel1,maximo;    // conversion result as read from result buffer
unsigned int offset,t0;    // buffer offset to point to the base of the idle buffer
char hola;

#define FOSC 500
#define CORE_TICK_PERIOD (FOSC/10)

void activar_1(void);
```



```

void activar_2(void);
void leer_pin(void);
void activar_1_2(void);
void todos_off(void);
void leer_AD(void);
void InitLEDs(void);

int main(void)
{

unsigned char data;
    char choice; //almacena elección de menu
    char repeat=0;
    int j=0,k=0,l=0,x=0,h=300,control=0;
    int fdb[4] = {0,0,0,0};

// Configurar frecuencia reloj
    SYSTEMConfigPerformance(SYSCLK);

// Abrir UART1 y habilitar
OpenUART1(UART_IDLE_CON | UART_EN | UART_NORMAL_RX | UART_ODD_PAR_8BIT
| UART_1STOPBIT|UART_MODE_SIMPLEX, UART_RX_ENABLE |UART_TX_PIN_NORMAL|
UART_TX_ENABLE, BAUD_VALUE);

    mPORTEClearBits(BIT_0);          // Turn off RA7 on startup.
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_0); // Make RA7 as output.

    SYSTEMConfigPerformance(2000000000L);

// Configurar y habilitar conversor A/D
    CloseADC10();
// ensure the ADC is off before setting the configuration

// Turn module on | ouput in integer | trigger mode auto | enable autosample
    #define PARAM1  ADC_MODULE_ON | ADC_FORMAT_INTG | ADC_CLK_AUTO |
ADC_AUTO_SAMPLING_ON

// ADC ref external    | disable offset test    | disable scan mode | perform 2 samples |
use dual buffers | use alternate mode
    #define PARAM2  ADC_VREF_AVDD_AVSS | ADC_OFFSET_CAL_DISABLE |
ADC_SCAN_OFF      |  ADC_SAMPLES_PER_INT_2    |  ADC_ALT_BUF_ON      |
ADC_ALT_INPUT_ON

    #define PARAM3  ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC | ADC_SAMPLE_TIME_15
    #define PARAM4  SKIP_SCAN_ALL

// configurar AN0 y AN1 como entradas analógicas
    #define PARAM5  ENABLE_AN0_ANA | ENABLE_AN1_ANA

    SetChanADC10(          ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF          |
ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0   |          ADC_CH0_NEG_SAMPLEB_NVREF   |
ADC_CH0_POS_SAMPLEB_AN1); // configure to sample AN4 & AN5
    OpenADC10( PARAM1, PARAM2, PARAM3, PARAM4, PARAM5 );

```



```

    EnableADC10(); // Enable the ADC

    DBINIT(); //Inicializa canal In-Out
    InitLEDs();

    while(1){

        while(repeat!='x')

        {

            choice = GetMenuChoice();

            switch(choice)
            {
                case '0':

                    while(1)
                    {

                        offset = 8 * ((~ReadActiveBufferADC10() & 0x01)); // determine which buffer is idle
                        and create an offset

                        channel0 = ReadADC10(offset);
                        // read the result of channel 4 conversion from the idle buffer

                        int j=0;
                        //se aplica filtro, media de cada 4 valores
                        for(j=4;j>0;j--) {

                            fdb[j] = fdb[j-1];
                        }
                        fdb[0] = channel0;
                        enviar(media(fdb)); //envio valor media intervalo de 4 valores a Matlab
                        control=recibir(); //recibo señal control (1 - 0)

                        if (control>0) activar_2();
                        else
                            todos_off();

                    }

                    break;

                case '5': //SALIR
                    repeat = 'x';
                    break;

                default:

                    DBPRINTF("Por favor pulsa 0,1,2,3 o 4!\n");

                    break;

            }

        }

    }

    CloseUART1();

```



```

    DBPRINTF("FIN programa. \n");
    }
    }
    return 0;

}

//*****FUNCIONES*****

char GetMenuChoice(void)
{
    char choice;
    choice = 'r';
    // lectura eleccion
    DBGETC(&choice);
    return choice;
}

int recibir(void) //recibe 2 bytes por puerto serie

{
    int num_16;
    for (i=0;i<6;i++)
    {
        while(!DataRdyUART1());
        n[i]=getcUART1();
    } //funcion especial por problemas en la comunicación serie

    for (i=0;i<6;i++) {
        if (n[i]==0) {n[i]=0;}
        if (n[i]==255) {n[i]=1;}
        if (n[i]==127) {n[i]=2;}
        if (n[i]==126) {n[i]=3;}
        if (n[i]==63) {n[i]=4;}
        if (n[i]==125) {n[i]=5;}
        if (n[i]==62) {n[i]=6;}
        if (n[i]==252) {n[i]=7;}
        if (n[i]==31) {n[i]=8;}
        if (n[i]==123) {n[i]=9;}

        if(i==2) {num[0]=100*n[i]+10*n[i-1]+n[i-2];}
        if(i==5) {num[1]=100*n[i]+10*n[i-1]+n[i-2];}

    }
    num_16=num[0]+num[1]*256;
    return num_16;
}

int enviar(int numero) //transformo valor 2 bytes en base 2^8 para envío. Existen
                        //problemas en el envío de datos grandes.
{
    int k1,k2;

    k1=numero % 256;
    k2=((numero-k1)/256)%256;

    WriteUART1(k1);

```



```

        WriteUART1(k2);
    return 1;
}

void InitLEDs(void)
{
    //puerto E
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_0);
    mPORTEClearBits(BIT_0);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_1);
    mPORTEClearBits(BIT_1);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_2);
    mPORTEClearBits(BIT_2);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_3);
    mPORTEClearBits(BIT_3);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_4);
    mPORTEClearBits(BIT_4);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_5);
    mPORTEClearBits(BIT_5);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_6);
    mPORTEClearBits(BIT_6);
    mPORTESetPinsDigitalOut(BIT_7);
    mPORTEClearBits(BIT_7);
    //puerto D
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_1);
    mPORTDClearBits(BIT_1);
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_2);
    mPORTDClearBits(BIT_2);
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_3);
    mPORTDClearBits(BIT_3);
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_4);
    mPORTDClearBits(BIT_4);
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_6);
    mPORTDClearBits(BIT_6);
    mPORTDSetPinsDigitalOut(BIT_7);
    mPORTDClearBits(BIT_7);
}
void activar_1(void)
{
    mPORTESetBits(BIT_2);
    mPORTESetBits(BIT_4);
    mPORTEClearBits(BIT_1);
    mPORTEClearBits(BIT_3);
}
void activar_2(void)
{
    mPORTESetBits(BIT_1);
    mPORTESetBits(BIT_3);
    mPORTEClearBits(BIT_2);
    mPORTEClearBits(BIT_4);
}
void activar_1_2(void)
{
    mPORTESetBits(BIT_2);
    mPORTESetBits(BIT_3);
    mPORTEClearBits(BIT_1);
    mPORTEClearBits(BIT_4) ;
}

```



```

}
void todos_off(void)
{
mPORTESetBits(BIT_1);
mPORTESetBits(BIT_4);
mPORTEClearBits(BIT_2);
mPORTEClearBits(BIT_3) ;
}
//función para generar PWM usada en las pruebas de la placa

void __ISR(_CORE_TIMER_VECTOR, ipl2) _CoreTimerHandler(void)
{
contador=contador+1;
    // clear the interrupt flag
    mCTClearIntFlag();

    // update the period
    UpdateCoreTimer(CORE_TICK_PERIOD);
    // .. things to do ..
    // mPORTEToggleBits(BIT_0 | BIT_1);

    if(contador>2)
    {
        PORTSetBits(IOPORT_E,BIT_0);
        //activar_1;
        mPORTESetBits(BIT_2);
        mPORTESetBits(BIT_4);
        mPORTEClearBits(BIT_1);
        mPORTEClearBits(BIT_3);
        contador=0;
    }
    else {PORTClearBits(IOPORT_E,BIT_0);
        //activar_2;
        mPORTESetBits(BIT_1);
        mPORTESetBits(BIT_3);
        mPORTEClearBits(BIT_2);
        mPORTEClearBits(BIT_4);
    }
}

//funcion media de cada 4 valores para eliminar error sensor

int media(int * fdb) {
int i=0;
    float sum=0;
    for (i=0;i<4;i++)
    {
        sum=sum+fdb[i];
    }
    return((int)(sum/4));
}

```



## 7.6 Programa Matlab

```
function [x]=nitinol()
PS=serial('COM4');
set(PS,'Baudrate',115200); % se configura la velocidad a 115200 Baudios
set(PS,'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno
set(PS,'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits
set(PS,'Parity','odd'); % se configura con paridad impar
set(PS,'Terminator','CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
set(PS,'OutputBufferSize',6); % "n" es el número de bytes a enviar
set(PS,'InputBufferSize',2); % "n" es el número de bytes a recibir
set(PS,'Timeout',5); % 5 segundos de tiempo de espera máxima
fopen(PS); % se abre el puerto com4

K=1;
positionCommand = [769,86,385]; %trayectoria 90°,10° y 45°
j=1;
tic;
while(1)
    r=fread(PS,2,'uint8'); % leer 2 bytes la posición real del PIC
    x=r(1)+r(2)*2^8 % transformo 2 bytes a entero decimal
    % control simple
    feedback = x;
    error = positionCommand(j) - feedback;
    if error > 0
        controlSignal = 1;
    else
        controlSignal = 0;
    end

    if (toc>2) % cada 2 segundos cambio a la posición siguiente
        j=j+1;
        tic;
    end

    if (j>3) % al llegar a la última posición vuelvo a la inicial
        j=1;
    end

    [z]=int_16(controlSignal); % transformación 2 bytes binario a
    % coeficientes en decimal para envío serie.
    for i=1:2
        [a,b,c]=dec(z(i));
        fwrite(PS,a,'uint8');
        fwrite(PS,b,'uint8');
        fwrite(PS,c,'uint8');
    end
end

fclose(PS); % fin comunicación serie

delete(PS);
clear PS;
```





## 7.7 Data sheets Componentes Electrónicos


**IRF530**
**Data Sheet**
**February 2002**

### 14A, 100V, 0.160 Ohm, N-Channel Power MOSFETs

These are N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistors. They are advanced power MOSFETs designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17411.

### Ordering Information

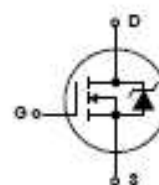
PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF530	TO-220AB	IRF530

NOTE: When ordering, use the entire part number.

### Features

- 14A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.160\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

### Symbol



### Packaging





## IRF530

**Absolute Maximum Ratings**  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

	IRF530	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage (Note 1)	100	V
Drain to Gate Voltage ( $R_{GS} = 20\text{k}\Omega$ ) (Note 1)	100	V
Continuous Drain Current	14	A
$T_C = 100^\circ\text{C}$	10	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	56	A
Gate to Source Voltage	$\pm 20$	V
Maximum Power Dissipation	79	W
Dissipation Derating Factor	0.53	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	69	mJ
Operating and Storage Temperature	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	300	$^\circ\text{C}$
Package Body for 10s, See Techbrief 334	260	$^\circ\text{C}$

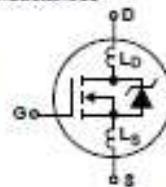
CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

## NOTE:

1.  $T_J = 25^\circ\text{C}$  to  $150^\circ\text{C}$ .

**Electrical Specifications**  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	$BV_{DSS}$	$I_D = 250\mu\text{A}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 10)	100	-	-	V
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$ , $I_D = 250\mu\text{A}$	2	-	4.0	V
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 95\text{V}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$ , $T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	250	$\mu\text{A}$
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)}$ MAX, $V_{GS} = 10\text{V}$	14	-	-	A
Gate to Source Leakage Current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	$\pm 500$	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	$I_D = 8.3\text{A}$ , $V_{GS} = 10\text{V}$ (Figures 8, 9)	-	0.14	0.16	$\Omega$
Forward Transconductance (Note 2)	$g_{fs}$	$V_{DS} \geq 50\text{V}$ , $I_D = 8.3\text{A}$ (Figure 12)	5.1	7.6	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$V_{DD} = 50\text{V}$ , $I_D = 14\text{A}$ , $R_G = 12\Omega$ , $R_L = 3.4\Omega$	-	12	15	ns
Rise Time	$t_r$	MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature	-	35	65	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	25	70	ns
Fall Time	$t_f$		-	25	59	ns
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_g(\text{TOT})$	$V_{GS} = 10\text{V}$ , $I_D = 14\text{A}$ , $V_{DS} = 0.6 \times \text{Rated } BV_{DSS}$	-	18	30	nC
Gate to Source Charge	$Q_{gs}$	$I_{D(REF)} = 1.5\text{mA}$ (Figure 14)	-	4	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	$Q_{gd}$	Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature	-	7	-	nC
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = 25\text{V}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$ , $f = 1\text{MHz}$ (Figure 11)	-	600	-	pF
Output Capacitance	$C_{oss}$		-	250	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$		-	50	-	pF
Internal Drain Inductance	$L_D$	Measured from the Contact Screw on Tab To Center of Die	-	3.5	-	nH
		Measured from the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to Center of Die	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$	Measured from the Source Lead, 6mm (0.25in) From Header to Source Bonding Pad	-	7.5	-	nH
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	1.9	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free Air Operation	-	-	62.5	$^\circ\text{C/W}$
			-	-	-	-





## IRF530

## Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Continuous Source to Drain Current	$I_{SD}$	Modified MOSFET Symbol Showing the Integral Reverse P-N Junction Diode	-	-	14	A
Pulse Source to Drain Current (Note 2)	$I_{SDM}$		-	-	56	A
Source to Drain Diode Voltage (Note 2)	$V_{SD}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = 14\text{A}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 13)	-	-	2.5	V
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = 14\text{A}$ , $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	5.5	120	250	ns
Reverse Recovery Charge	$Q_{RR}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_{SD} = 14\text{A}$ , $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	0.17	0.6	1.3	$\mu\text{C}$

NOTES:

2. Pulse test: pulse width  $\leq 300\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .
3. Repetitive rating: pulse width limited by Max junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
4.  $V_{DD} = 25\text{V}$ , starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 530\mu\text{H}$ ,  $R_G = 25\Omega$ , peak  $I_{AS} = 14\text{A}$  (Figures 15, 16).

## Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

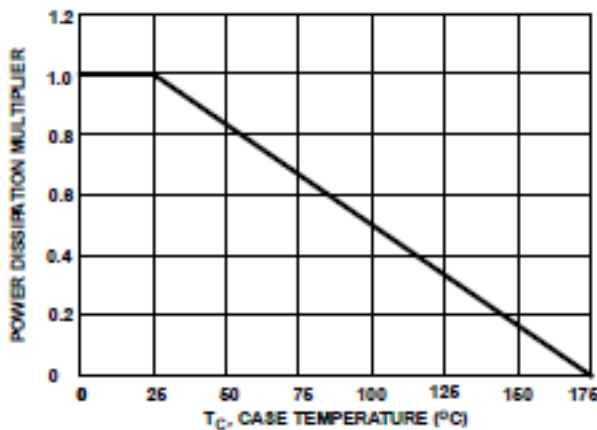


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

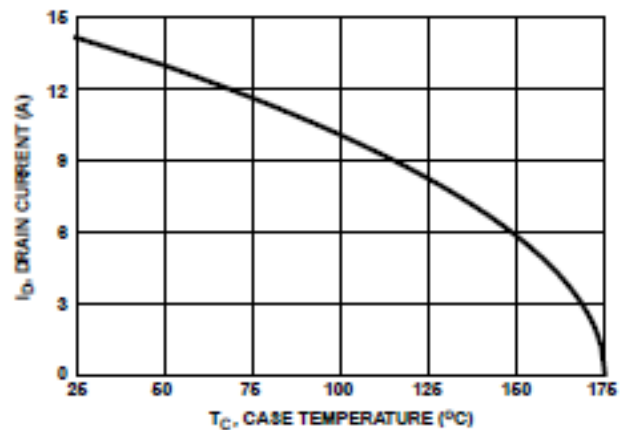


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

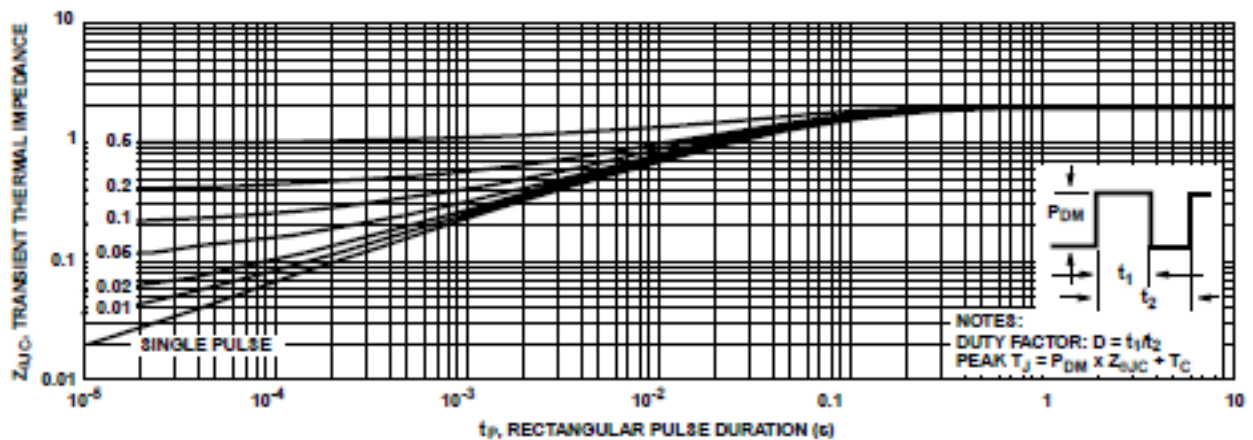


FIGURE 3. MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE





## Low power quad op amps

**LM124/224/324/324A/  
SA534/LM2902**

### DESCRIPTION

The LM124/SA534/LM2902 series consists of four independent, high-gain, internally frequency-compensated operational amplifiers designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages.

### UNIQUE FEATURES

In the linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

The unity gain crossover frequency and the input bias current are temperature-compensated.

### FEATURES

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1 MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range Single supply:  $3 V_{DC}$  to  $30 V_{DC}$  or dual supplies:  $\pm 1.5 V_{DC}$  to  $\pm 15 V_{DC}$
- Very low supply current drain: essentially independent of supply voltage (1 mW/op amp at  $+5 V_{DC}$ )
- Low input biasing current: 45 nA<sub>DC</sub> (temperature-compensated)
- Low input offset voltage: 2 mV<sub>DC</sub> and offset current: 5 nA<sub>DC</sub>
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage:  $0 V_{DC}$  to  $V_{CC}-1.5 V_{DC}$  swing

### PIN CONFIGURATION

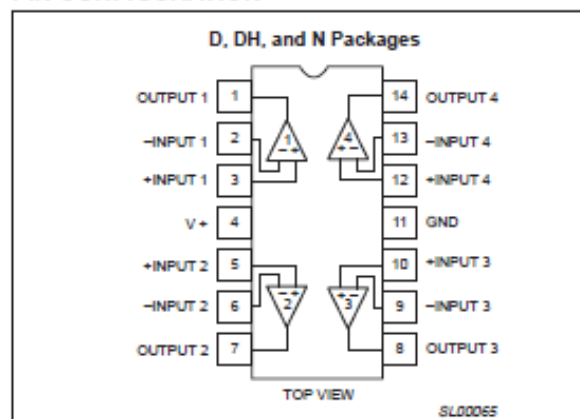


Figure 1. Pin configuration.

### ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	LM124N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-25°C to +85°C	LM224D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25°C to +85°C	LM224N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324D	SOT108-1
14-Pin Plastic Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP)	0°C to +70°C	LM324DH	SOT402-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324AD	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324AN	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA534D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA534N	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +125°C	LM2902D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +125°C	LM2902N	SOT27-1
14-Pin Plastic Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP)	-40°C to +125°C	LM2902DH	SOT402-1



## Angular and rotary sensors

### → Hall effect for control & servocontrol in severe environments

- Technology: non-contact Hall effect
- Long service life: 35 million cycles, 100 million in oscillation mode
- Compact dimensions
- 2 independent outputs for data redundancy
- Electrical travel 90° as standard, 120° as an option
- Numerous adaptations made to order



#### Part numbers

Effective electrical travel	Mechanical travel	Number of outputs	Sensor height	Type of axle	Forward rotation	Reverse rotation	Any direction of rotation *
90 °	180 °	2	26 mm	Male	89121201	89121211	89121221
90 °	180 °	1	26 mm	Male	89121101	89121111	89121121
120 °	180 °	2	26 mm	Male	89121401	89121411	89121421
120 °	180 °	1	26 mm	Male	89121301	89121311	89121321

#### Comments

\* Models without spring return

#### Electrical characteristics

Measurable angle	120° max.	120° max.	120° max.
Nominal supply voltage	5 ±0.25 V ---	5 ±0.25 V ---	5 ±0.25 V ---
Output 1	0.5 → 4.5 V ---	0.5 → 4.5 V ---	0.5 → 4.5 V ---
Output 2	0.25 → 2.25 V ---	0.25 → 2.25 V ---	0.25 → 2.25 V ---
Response time	1 ms	1 ms	1 ms
Max. current	10 mA	10 mA	10 mA
Linearity	± 2% (version 90°) ± 3% (version 120°)	± 2% (version 90°) ± 3% (version 120°)	± 2% (version 90°) ± 3% (version 120°)
Over - voltage protection	18 V ---	18 V ---	18 V ---
Protection against polarity inversions	-14.5 V ---	-14.5 V ---	-14.5 V ---
Short-circuit protection	✓	✓	✓

#### Environmental and mechanical characteristics

Maximal mechanical angle	180°	180°	180°
Mechanical life (millions of cycles)	35 (100 in oscillation mode)	35 (100 in oscillation mode)	35 (100 in oscillation mode)
Protection index	IP66/IP67	IP66/IP67	IP66/IP67
Operating temperature	-40° → +85° C	-40° → +85° C	-40° → +85° C
Vibration resistance	10 G, 20 → 2000 Hz	10 G, 20 → 2000 Hz	10 G, 20 → 2000 Hz
Schock resistance	50 G	50 G	50 G
Humidity	95% / 40°C	95% / 40°C	95% / 40°C
Electromagnetic compatibility	100 V/m - 14 K Hz → 1 G Hz	100 V/m - 14 K Hz → 1 G Hz	100 V/m - 14 K Hz → 1 G Hz
Weight	40 g	40 g	40 g

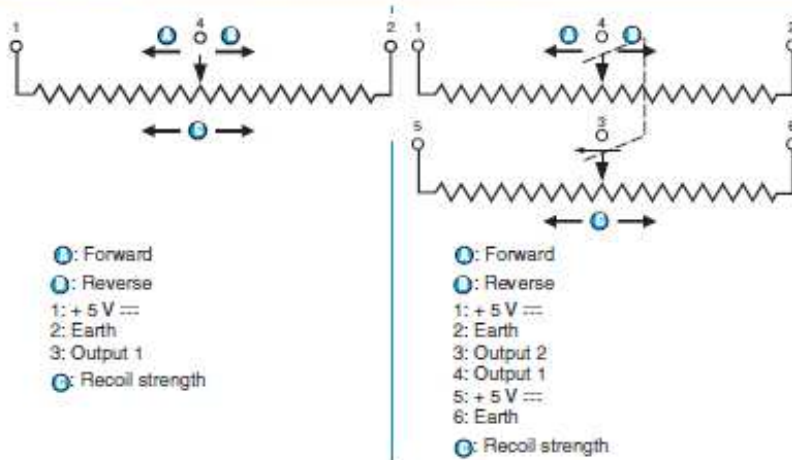
#### Product adaptations



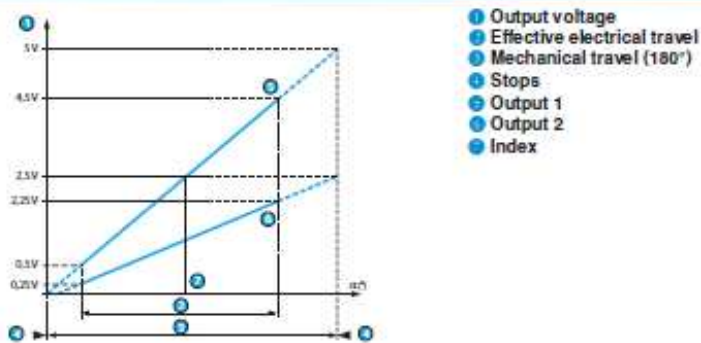
- Electrical angle to customer specification or extended from 40° → 120°
- Sensor supply voltage 12 V ---, 24 V --- max.
- Output signals 1 & 2 can be configured (gain, slope, offset)
- Output shaft to customer specification
- Special lever
- Extended temperature range: -40° → 125 °C
- Low or high operating torque
- Customisable products (logo, text)


[www.aps.crouzet.com](http://www.aps.crouzet.com)

## Connections



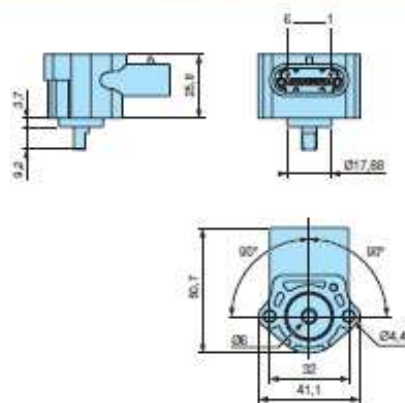
## Curves



## Accessories

Description	Code
ME1H1-Pack 150 Series Packard Electric male connector with 6 pins - length: 280 mm - cross-section 18 AWG	25589121

## Dimensions





## Angular and rotary sensors

### → Potentiometer for control & servocontrol in severe environments

- Suitable for all applications in severe environments: impacts, vibration, temperature
- Technology: conductive plastic track
- Number of outputs: 1 → 2 for redundant data applications
- Service life: 1 million cycles, 5 million in oscillation mode
- Electrical travel from 85° → 130°
- 2% linearity
- Numerous adaptations made to order



#### Part numbers

Effective electrical travel	Mechanical travel	Number of outputs	Sensor height	Type of axle	Forward rotation	Reverse rotation
85 °	120 °	1	43 mm	Female	89120101	89120111
85 °	120 °	1	43 mm	Male	89120102	89120112
85 °	120 °	1	33 mm	Female	89120103	89120113
85 °	120 °	1	33 mm	Male	89120104	89120114
85 °	120 °	1	16 mm	22.5 mm lever	89120105	89120115
85 °	120 °	1	26 mm	Female	89120106	89120116
85 °	120 °	1	26 mm	Female	89120107	89120117
85 °	120 °	2	25 mm	Female	89120201	89120211
85 °	120 °	2	25 mm	Female	89120202	89120212
130 °	180 °	1	25 mm	Female	89120301	89120311
130 °	180 °	1	26 mm	Female	89120302	89120312

#### Comments

All models except 891201-7 / 891201-3 / 891202-2 can be adjusted using an oblong hole

#### Electrical characteristics

Linearity	2%	2%
Max. power	0.15 W	0.15 W
Resistance	5 K $\Omega$ $\pm$ 20%	5 K $\Omega$ $\pm$ 20%
Max. supply voltage	27 V ---	27 V ---
Max. current	5.4 mA	5.4 mA

#### Mechanical characteristics

Mechanical life (millions of cycles)	1 (5 in oscillation mode)	1 (5 in oscillation mode)
Protection index	IP66/IP67 for models 89120106/107/116/117 and 891202-- / 3--	IP66/IP67 for models 89120106/107/116/117 and 891202-- / 3--
Operating temperature	-40°C → 135°C	-40°C → 135°C
Vibration resistance	15 G, 15 → 1000 Hz	15 G, 15 → 1000 Hz
Schock resistance	50 G	50 G
Humidity	95% / 38°C	95% / 38°C
Maximum torque at the end stop	0.68 N.m	0.68 N.m
Conformity with environmental directives	RoHS depending on the model	RoHS depending on the model

#### Product adaptations

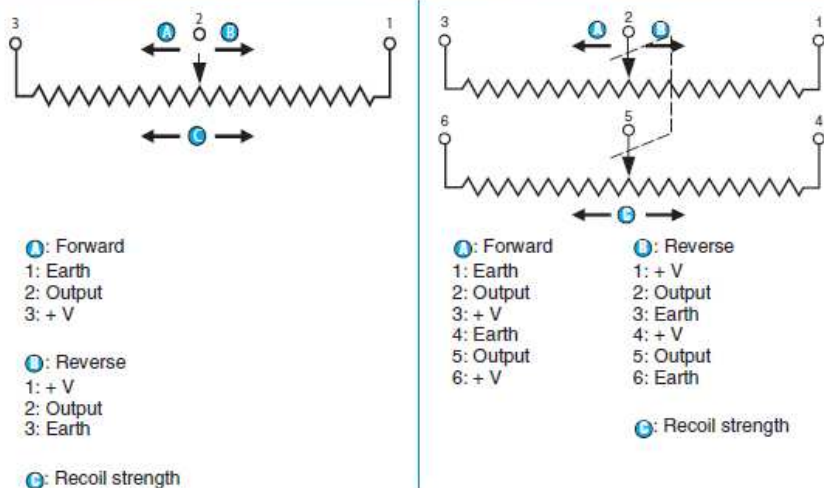


- Electrical angle to customer specification
- Sensor resistance
- Output shaft
- Low or high operating torque
- Customisable products (logo, text)



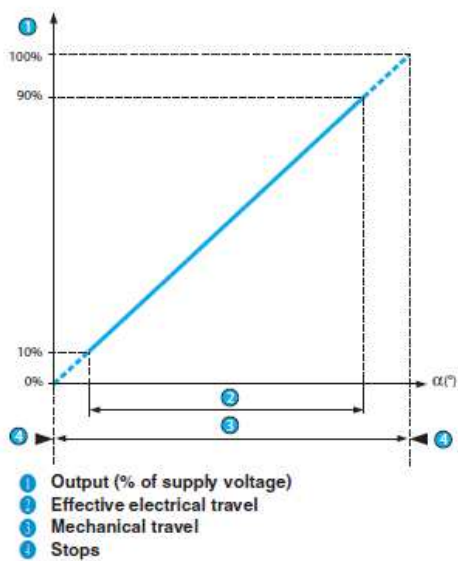
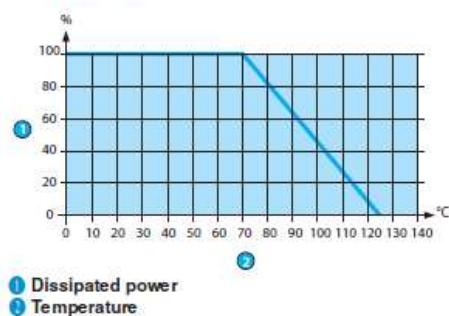

[www.aps.crouzet.com](http://www.aps.crouzet.com)

### Connections



### Curves

#### Dissipation curve



### Accessories

Description	Version	Code
Packard Electric male connector with 3 pins - length: 280 mm - cross-section 18 AWG	89120101 / 111 / 103 / 113	79551001
METRI-Pack 150 Series Packard Electric male connector with 3 pins - length: 280 mm - cross-section 18 AWG	89120106 / 116 / 107 / 117 89120301 / 311 / 302 / 312	25589120
METRI-Pack 150 Series Packard Electric male connector with 6 pins - length: 280 mm - cross-section 18 AWG	891202-1 ou 891202-2	25589121





# PIC32MX3XX/4XX

## High-Performance 80 MHz MIPS-Based 32-bit Flash Microcontroller 64/100-Pin General Purpose and USB

### High-Performance 32-bit RISC CPU:

- MIPS32® M4K™ 32-bit Core with 5-Stage Pipeline
- 80 MHz Maximum Frequency
- 1.56 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) Performance at 0 Wait State Flash Access
- Single-Cycle Multiply and High-Performance Divide Unit
- MIPS16e™ Mode for Up to 40% Smaller Code Size
- Two Sets of 32 Core Register Files (32-bit) to Reduce Interrupt Latency
- Prefetch Cache Module to Speed Execution from Flash

### Microcontroller Features:

- Operating Voltage Range of 2.3V to 3.6V
- 32K to 512K Flash Memory (plus an additional 12KB of Boot Flash)
- 8K to 32K SRAM Memory
- Pin-Compatible with Most PIC24/dsPIC® Devices
- Multiple Power Management Modes
- Multiple Interrupt Vectors with Individually Programmable Priority
- Fail-Safe Clock Monitor Mode
- Configurable Watchdog Timer with On-Chip Low-Power RC Oscillator for Reliable Operation

### Peripheral Features:

- Atomic SET, CLEAR and INVERT Operation on Select Peripheral Registers
- Up to 4-Channel Hardware DMA with Automatic Data Size Detection
- USB 2.0 Compliant Full Speed Device and On-The-Go (OTG) Controller
- USB has a Dedicated DMA Channel
- 10 MHz to 40 MHz Crystal Oscillator
- Internal 8 MHz and 32 kHz Oscillators

- Separate PLLs for CPU and USB Clocks
- Two I<sup>2</sup>C™ Modules
- Two UART Modules with:
  - RS-232, RS-485 and LIN 1.2 support
  - IrDA® with On-Chip Hardware Encoder and Decoder
- Parallel Master and Slave Port (PMP/PSP) with 8-bit and 16-bit Data and Up to 16 Address Lines
- Hardware Real-Time Clock/Calendar (RTCC)
- Five 16-bit Timers/Counters (two 16-bit pairs combine to create two 32-bit timers)
- Five Capture Inputs
- Five Compare/PWM Outputs
- Five External Interrupt Pins
- High-Speed I/O Pins Capable of Toggling at Up to 80 MHz
- High-Current Sink/Source (18 mA/18 mA) on All I/O Pins
- Configurable Open-Drain Output on Digital I/O Pins

### Debug Features:

- Two Programming and Debugging Interfaces:
  - 2-Wire Interface with Unintrusive Access and Real-time Data Exchange with Application
  - 4-wire MIPS® Standard Enhanced JTAG interface
- Unintrusive Hardware-Based Instruction Trace
- IEEE Std 1149.2 Compatible (JTAG) Boundary Scan

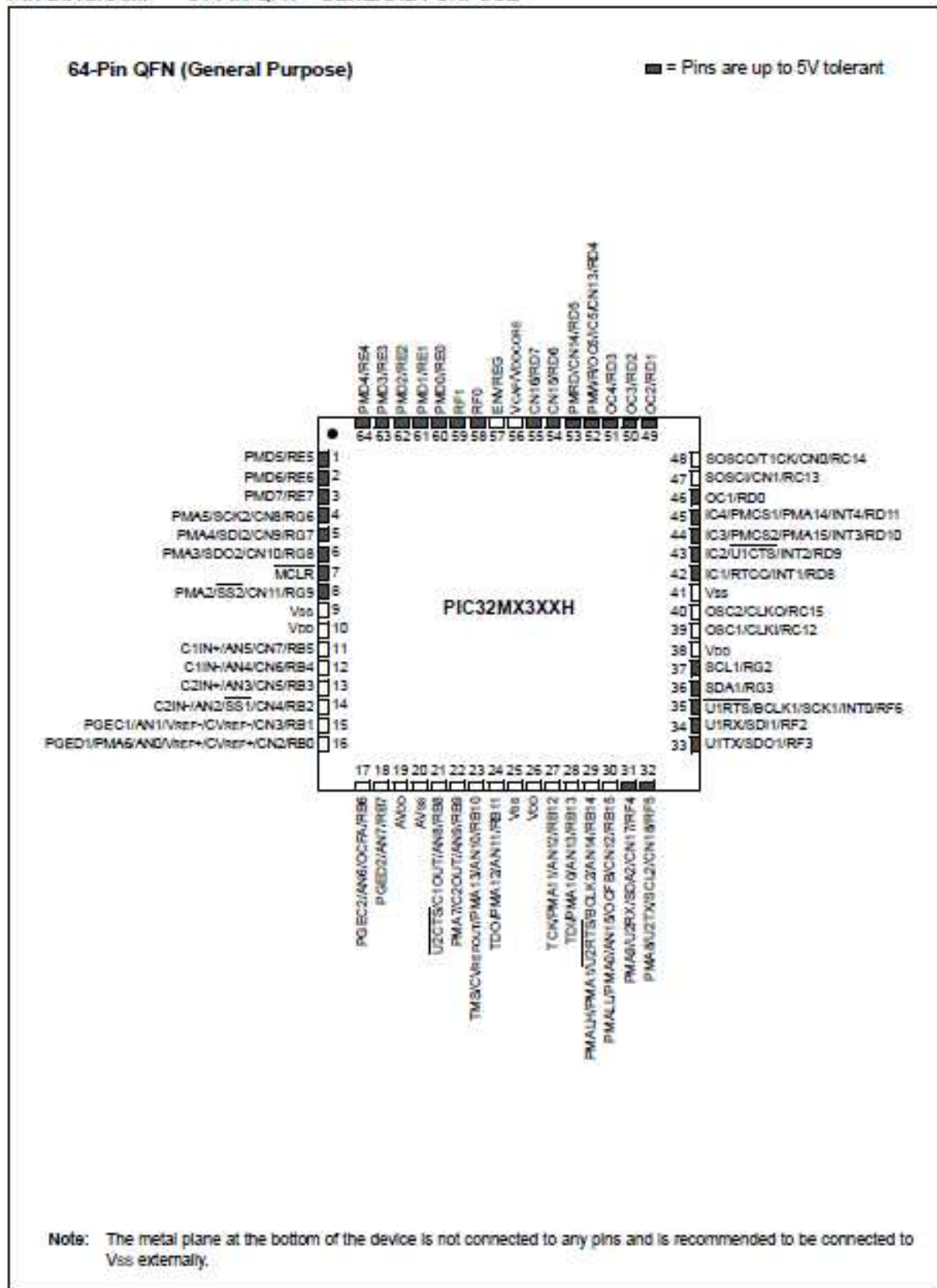
### Analog Features:

- Up to 16-Channel 10-bit Analog-to-Digital Converter:
  - 1000 ksp/s Conversion Rate
  - Conversion Available During Sleep, Idle
- Two Analog Comparators
- 5V Tolerant Input Pins (digital pins only)



# PIC32MX3XX/4XX

## PIN DIAGRAM: 64-PIN QFN – GENERAL PURPOSE





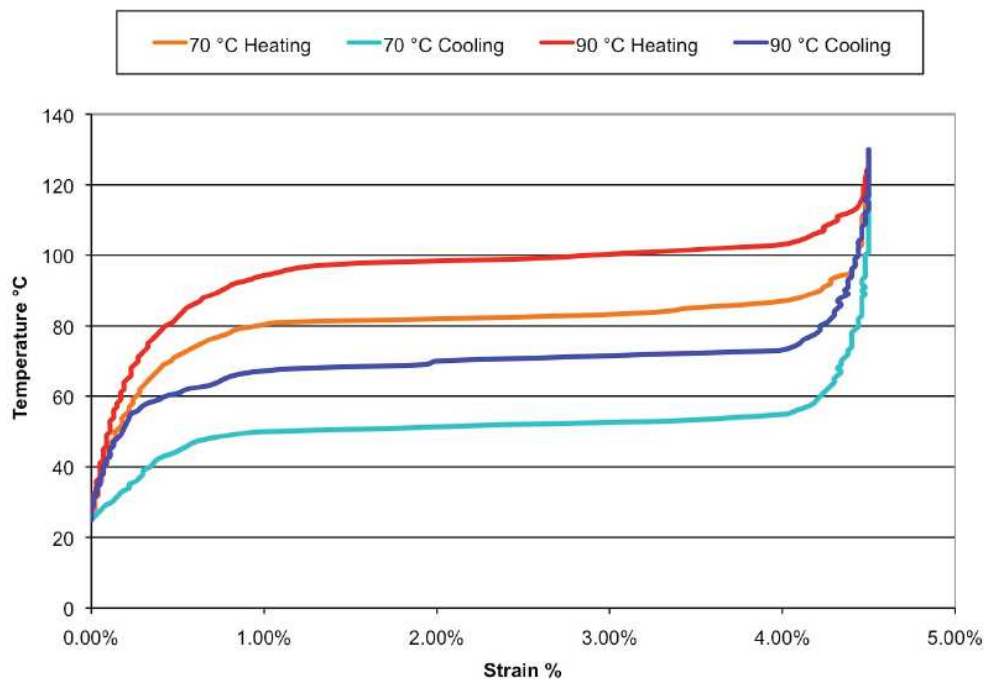
## 7.8 Cable de nitinol



**DYNALLOY, Inc.**  
Makers of Dynamic Alloys

### NICKEL - TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES

1. Density	0.235 lb/in <sup>3</sup> (6.45 g/cm <sup>3</sup> )
2. Specific Heat	0.20 BTU/lb * °F (0.2 cal/g * °C)
3. Melting Point	2370 °F (1300 °C)
4. Latent Heat of Transformation	10.4 BTU/lb (5.78 cal/g)
5. Thermal Conductivity	10.4 BTU/hr * ft * °F (0.18 W/cm * °C)
6. Thermal Expansion Coefficient	
Martensite	$3.67 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$ ( $6.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
Austenite	$6.11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$ ( $11.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
7. Electrical Resistivity (approx.)	
Martensite:	32 micro-ohms * in (80 micro-ohms * cm)
Austenite:	39 micro-ohms * in (100 micro-ohms * cm)



Typical Temperature vs. Strain Characteristics for Dynalloy's standard 158°F (70°C) "LT" and 194°F (90°C) "HT" Austenite start temperature alloys, at 172 MPa



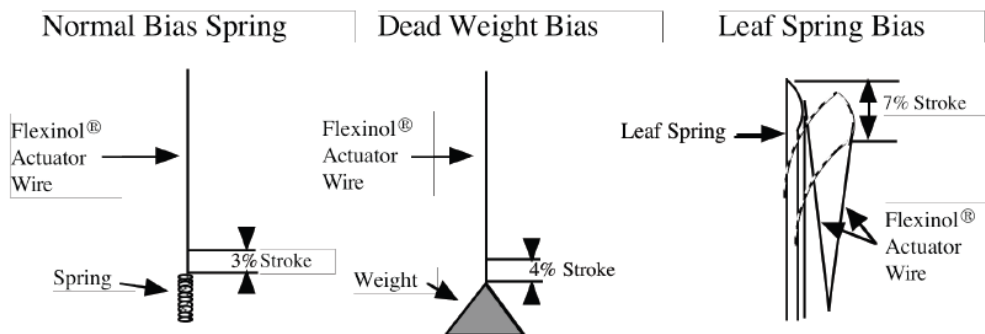


**DYNALLOY, Inc.**  
Makers of Dynamic Alloys

## Section 1. Movement

The movement or stroke of Flexinol® actuator wire is measured as a percentage of the length of the wire being used and is determined, in part, by the level of stress one uses to reset the wire, or to stretch it in its low temperature phase. This opposing force, used to stretch the wire, is called the bias force. In most applications, the bias force is exerted on the wire constantly, and on each cycle as the wire cools, this force elongates it. If no force is exerted as the wire cools, very little deformation or stretch occurs in the cool, room temperature state and correspondingly very little contraction occurs upon heating. Up to a point the higher the load the higher the stroke. The strength of the wire, its pulling force and the bias force needed to stretch the wire back out are a function of the wire size or cross sectional area and can be measured in pounds per square inch or “psi”. If a load of 5,000 psi (34.5 MPa) is maintained during cooling, then about 3% memory strain will be obtained. At 10,000 psi (69 MPa), about 4% results, and with 15,000 psi (103 MPa) and above, nearly 5% is obtained. However, there is a limit to how much stress can be applied.

Far more important to stroke is how the wire is physically attached and made to operate. Dynamics in applied stress and leverage also vary how much the actuator wires move. While normal bias springs that increase their force as the Flexinol® actuators contract have only 3-4% stroke, reverse bias forces which decrease as the actuator wires contract can readily allow the wire to flex up to 7%. Mechanics of the device in which it is used can convert this small stroke into movements over 100% of the wires' length and at the same time provide a reverse bias force. The stress or force exerted by Flexinol® actuator wires is sufficient to be leveraged into significant movement and still be quite strong. Some basic structures, their percent of movement, and the approximate available force they offer in different wire sizes are as follows:

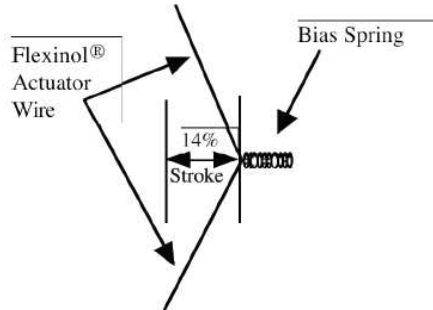


F1140Rev H

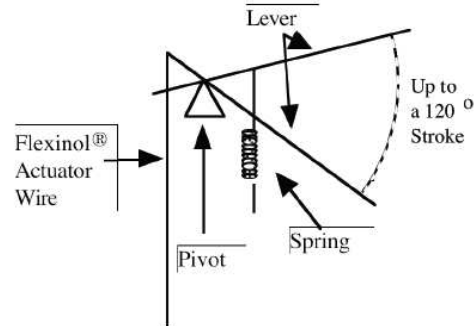


**DYNALLOY, Inc.**  
Makers of Dynamic Alloys

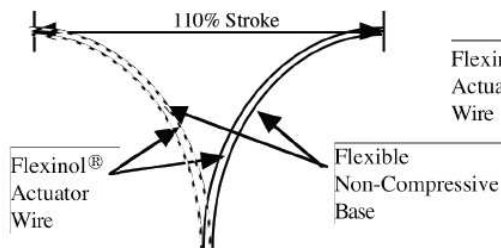
Right Angle Pull



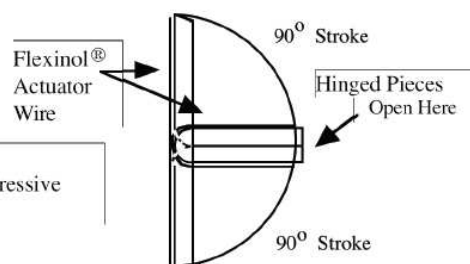
Simple Lever



Adjusting Curvature



Clam Shell



Stroke and Available Force Table

	Approx. Stroke	0.003" Wire (0.076 mm)	0.006" Wire (0.15 mm)	0.010" Wire (0.25 mm)
Normal Bias Spring	3%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Dead Weight Bias	4%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Leaf Spring Bias	7%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Right Angle Pull	14%	0.04 lb (20 g)	0.18 lb (83 g)	0.51 lb (232 g)
Simple Lever (6:1 ex)	30%	0.024lb (11 g)	0.10 lb (47 g)	0.29 lb (133 g)
Adjusting Curvature	110%	0.006 lb (3 g)	0.026 lb (12 g)	0.075 lb (34 g)
Clam Shell	100%	0.007 lb (3.2 g)	0.028 lb (13 g)	0.082 lb (37 g)



**DYNALLOY, Inc.**  
Makers of Dynamic Alloys

## Section 2. Electrical Guidelines

If Flexinol® actuator wire is used in the appropriate conditions then obtaining repeatable motion from the wire for tens of millions of cycles is reasonable. If higher stresses or strains are imposed, then the memory strain is likely to slowly decrease and good motion may be obtain for only hundreds or a few thousands of cycles. The permanent deformation that occurs in the wire during cycling is heavily a function of the stress imposed and the temperature under which the actuator wire is operating. Flexinol® wire has been specially processed to minimize this straining, but if the stress is too great or the temperature too high some permanent strain will occur. Since temperature is directly related to current density passing through the wire care should be taken to heat, but not overheat, the actuator wire. The following charts give rough guidelines as to how much current and force to expect with various wire sizes.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C "LT" Wire *** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C "HT" Wire *** (seconds)
0.001 (0.25)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.38)	22.6 (890)	0.04 (20)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	200	1.1	0.9
0.005, (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4000	16.8	14.0

\* The pulling force is based on 25,000 psi (172 MPa), which for many applications is the maximum safe stress for the wire. However, many applications use higher and lower stress levels. This depends on the specific conditions of a given design.

\*\* The contraction time is directly related to current input. The figures used here are only approximate since room temperatures, air currents, and heat sinking of specific devices vary. On small diameter wires ( $\leq 0.006$ " diameter) currents that heat the wire in 1 second can typically be left on without over-heating it.

\*\*\* Approximate cooling time, at room temperature in static air, using a vertical wire. The last 0.5% of deformation is not used in these approximations.

F1140Rev H



**DYNALLOY, Inc.**  
Makers of Dynamic Alloys

## Relative Effects of Cooling Methods

	Improvement in Speed
Increasing Stress	1.2:1
Using Higher Temperature Wire	2:1
Using Solid Heat Sink materials	2:1
Forced Air	4:1
Heat Conductive Grease	10:1
Oil Immersion	25:1
Water with Glycol	100:1

\*These improvements are not accumulative on the same basis when used together.

Better cooling methods are likely to require more current or heat to move and/or hold the wire in an "on" position. In some cases one may wish to quickly turn the wire on (that is electrically heat it until it contracts) then hold it on for some time. This will likely require a two-step driving current with a larger current to heat the wire and a reduced current to keep it hot without overheating it. There are a number of simple circuits, which will do this.